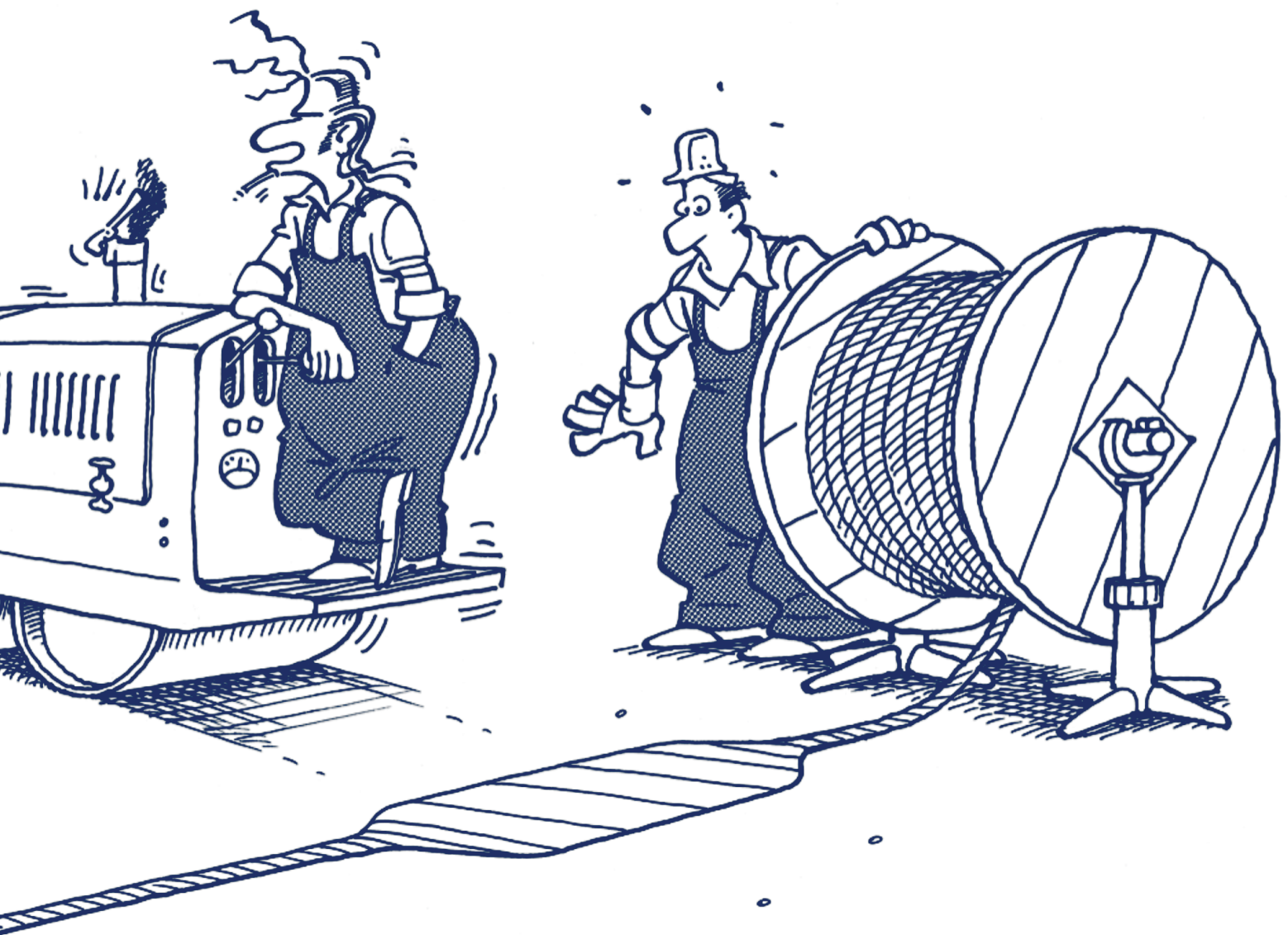


WIRE ROPE

TECHNOLOGY AACHEN



**Liny stalowe do dźwignic
Problemy i rozwiązania**

Liny stalowe do dźwignic Problemy i rozwiązania

Autor: Dyp. Inż. Roland Verreet

Spis treści

1. Lina stalowa jako niezbędny element maszyny	4
2. Problem: lokalna koncentracja pęknięć drutów	6
3. Problem: wewnętrzne pęknięcia drutów.....	7
4. Problem: wewnętrzne pęknięcia drutów w konwencjonalnych linach	10
5. Magnetyczne badanie lin stalowych	15
6. Problem: korozja lin stalowych	16
7. Problem: niezadowalający okres użytkowania lin stalowych	17
8. Problem: poluzowanie splotek oraz tworzenie się koszy splotkowych	26
9. Problem: uszkodzenia mechaniczne lin stalowych na bębnie linowym.....	31
10. Problem: dobre liny są drogie	33

© 2002, 2004, 2012, 2018, 2025 Ingenieurbüro für Drahtseiltechnik Wire Rope Technology Aachen GmbH

Kreskówki: Rolf Bunse

Layout i skład: Benedikt Dolzer, Aachen

Tłumaczenie na język polski: Stanisław Świdorski

Przedruk, również częściowy, wyłącznie za pisemną zgodą Autora.

1. Lina stalowa jako niezbędny element maszyny

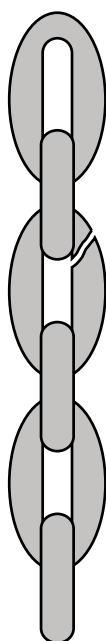
W czasie wizualnej kontroli liny stalowej kontroler wykrył 10000 pęknięć drutów. Według jego opinii lina stalowa nie nadaje się jeszcze do wymiany. Czy mógł mieć rację?

Przed wynalezieniem liny stalowej w roku 1834, łańcuchy były najbardziej rozpowszechnionymi, powszechnie używanymi środkami do podnoszenia. Łańcuchy mają jednakże jedną istotną wadę: są połączeniami szeregowymi elementów nośnych. Jeżeli pęka choćby jedno ogniwo łańcucha (rys. 1), zawodzi cały system i ciężar spada.

Liny są połączeniami równoległymi elementów nośnych. Jeżeli jeden z elementów liny drucianej zerwie się, siła niszcząca linę jest z reguły osłabiana o mniej niż 1% (rys. 2), a takie osłabienie dotyczy również jedynie krótkiego odcinka liny.

Liny stalowe to wielokrotne, redundantne systemy elementów nośnych. W systemie redundantnym każdy element niezbędny do prawidłowego funkcjonowania systemu występuje co najmniej dwukrotnie. Na przykład, niektóre części naszego ciała są redundantne: Jeśli stracimy wzrok w jednym oku, nadal będziemy widzieć. A jeśli stracimy słuch w jednym uchu, nadal będziemy słyszeć. Jeśli w linie stalowej pęknie jeden drut, nadal pozostaje około 250 innych drutów, mogących unieść obciążenia.

Ale co się stanie, jeśli w trakcie użytkowania liny coraz więcej z tych drutów ulegnie uszkodzeniu? Jeśli stracimy wzrok w obu oczach, nie będziemy już widzieć. A jeśli stracimy słuch w obu uszach, nie będziemy już słyszeć. Czy zatem lina stalowa nie powinna ulec uszkodzeniu również wtedy, gdy każdy z jej 250 drutów ulegnie zerwaniu?



Rys. 1: Łańcuch. Pęknięcie jednego elementu łańcucha prowadzi do awarii całego systemu.



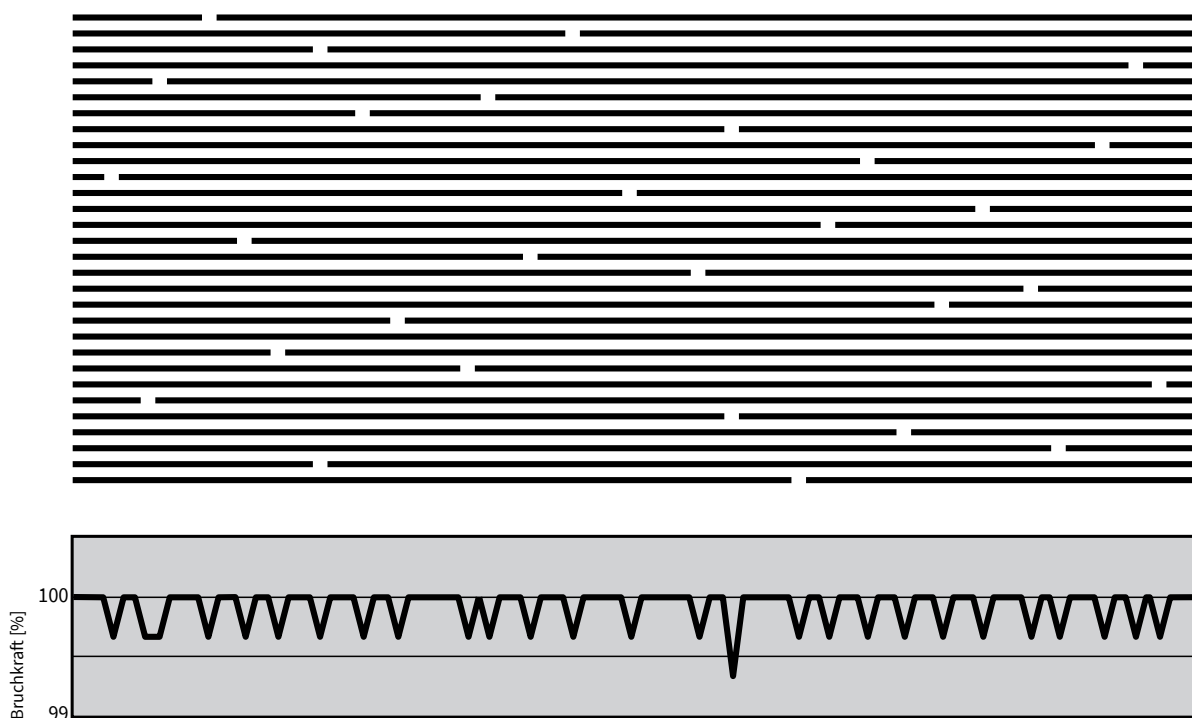
Rys. 2: Lina stalowa. Pęknięcie jednego elementu nie ma praktycznie żadnego znaczenia.

Nie. Brzmi to nieprawdopodobnie, ale lina stalowa może zawsze być jeszcze w dobrym stanie, nawet jeżeli każdy jej drut uległ pęknięciu 200 razy!

Rys. 3 pokazuje schematyczne przyporządkowanie 250 drutów linowych, z jakich skonstruowano naszą lina stalową. Ze względu na ograniczone miejsce na tekst, przedstawiono jedynie 30 drutów liny. Wzdłuż liny każdy z 250 drutów jest zerwany raz. Każde zerwanie drutu oznacza jednak jedynie lokalne zmniejszenie wytrzymałości liny na zerwanie. Kilka milimetrów od miejsca zerwania, zerwany drut ponownie przejmie pełną część obciążenia.

Jeśli mamy bardzo równomierny rozkład pęknięć drutu na całej długości liny, tak że w każdym krótkim odcinku liny występuje tylko jedno pęknięcie drutu, wytrzymałość na zerwanie każdego z tych odcinków zmniejsza się o mniej niż jeden procent. W teście rozciągania ta lina stalowa może osiągnąć pełną wartość katalogową wytrzymałości na zerwanie, nawet jeśli każdy z jej elementów jest zerwany!

Każde pęknięcie drutu stanowi jedynie lokalne zmniejszenie siły zrywającej lina. W odległości kilku milimetrów od miejsca pęknięcia ponownie każdy drut liny ma swój udział w przenoszeniu obciążenia. Jeśli mamy bardzo równomierny rozkład pęknięć drutów wzdłuż długości liny, wówczas w każdym krótkim kawałku liny, tzn. w przenośni w każdym plasterku liny drucianej (krążku o kształcie przekroju „salamy”), wykryte może zostać jedynie jedno pęknięcie drutu, siła niszcząca każdego z poszczególnych tych odcinków ulega osłabieniu jedynie o mniej niż 1%.



Rys. 3: Każde pęknięcie drutu powoduje tylko miejscowe nieznaczne obniżenie siły zrywającej lina.

W próbie rozciągania, taka lina stalowa powinna osiągnąć swoją pełną minimalną – wykazaną w katalogu – siłę zrywającą, chociaż każdy z jej indywidualnych elementów pęknął jeden raz.

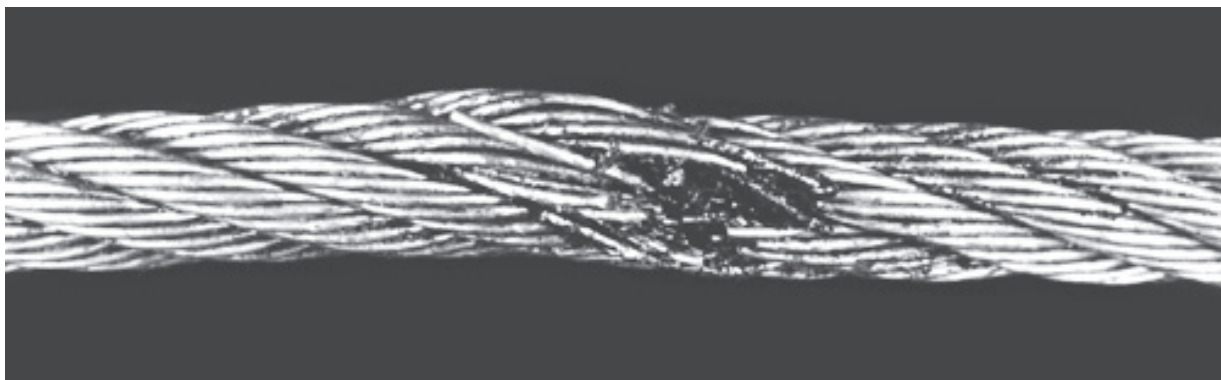
Pomimo tego, możemy dopuścić jedynie określoną liczbę pęknięć drutów, przypadających na jednostkę długości liny. Liczba pęknięć drutów do wymiany liny jest określana - w różnych krajowych normach i normach międzynarodowych oraz w przepisach towarzystw kwalifikacyjnych - jako dopuszczalna liczba pęknięć w odniesieniu do jednostki długości, która podawana jest jako wielokrotność średnicy liny. Zazwyczaj liczba pęknięć drutów dla długości $30 \times$ średnica liny (odpowiada to pięciu skokom liny) oraz $6 \times$ średnica liny, (co odpowiada ok. jednemu skokowi liny).

Nasz inspektor zidentyfikował 10000 pęknięć drutów, ale liczba pęknięć drutów do wymiany nie została uzyskana w żadnym z pojedynczych kawałków liny o długości $30 \times \emptyset$ lub $6 \times \emptyset$. Jego decyzja dotycząca pozostawienia liny na dźwignicy była tym samym słuszna. Powyższy przykład świadczy o tym, iż w normalnych warunkach lina stalowa jest bardzo bezpiecznym i niezawodnym elementem maszyny.

2. Problem: lokalna koncentracja pęknięć drutów

Kilka dni później, nasz inspektor bada linę nośną bliźniaczej dźwignicy. Stwierdza – w wyniku badania – jedynie 15 pęknięć drutów. W tym przypadku jednak lina stalowa musi zostać wymieniona. Porównując tę decyzję z dopuszczeniem liny z 10000 pęknięć drutów na dźwignicy o podobnej konstrukcji, taka decyzja brzmi nieco dziwnie. Czy nasz Inspektor się myli?

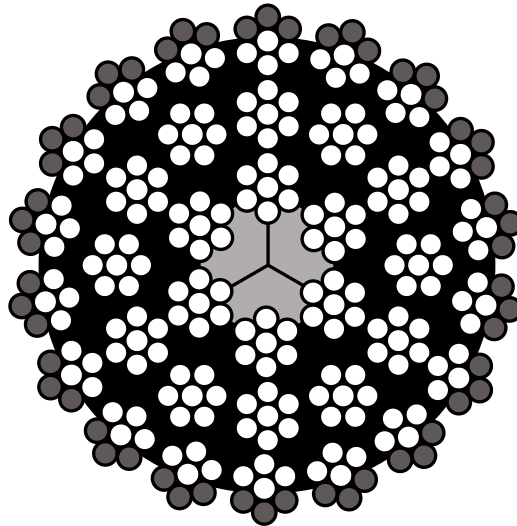
Jeśli pęknięcia drutów są skoncentrowane na bardzo krótkim odcinku liny (rys. 4), na przykład wskutek wadliwego wykonania liny stalowej lub na skutek mechanicznego uszkodzenia, następuje dodawanie sił zrywających pojedynczych pęknięć drutów – w obrębie tego odcinka – do wartości krytycznej. I chociaż pozostałe 500 m liny jest pozbawione pęknięć, linę tę należy wymienić, bowiem 5 cm znajduje się w złym stanie.



Rys. 4: Liny stalowe z lokalną koncentracją pęknięć drutów nie są ruchowo bezpieczne. Decyzja naszego inspektora o wymianie liny jest słuszna.

3. Problem: wewnętrzne pęknięcia drutów

Lina nośna trzeciej dźwignicy o identycznej konstrukcji nie wykazuje żadnego pojedynczego zewnętrznego pęknięcia drutu. Jednakże po zbadaniu liny inspektor postanawia, że lina nośna musi zostać wymieniona. Dlaczego?



Rys. 5: Jedynie 20% metalicznego przekroju poprzecznego (przedstawiony w kolorze szarym) może podlegać wizualnej kontroli.

Podczas wizualnej kontroli liny stalowej ocenie może podlegać jedynie stan jej drutów zewnętrznych. Przekrój metalowych drutów zewnętrznych danej liny stalowej wynosi jednakże mniej niż 40% całego metalicznego przekroju poprzecznego liny, a widoczna jest jedynie połowa długości tych drutów (rys. 5).

Oznacza to, że w przypadku wizualnej kontroli lin stalowych, możemy dokonać oceny stanu zaledwie 20% metalicznego przekroju poprzecznego liny. Jeżeli chodzi o pozostałą część - 80% metalicznego przekroju poprzecznego - możemy mieć tylko nadzieję, że lina jest w porządku.

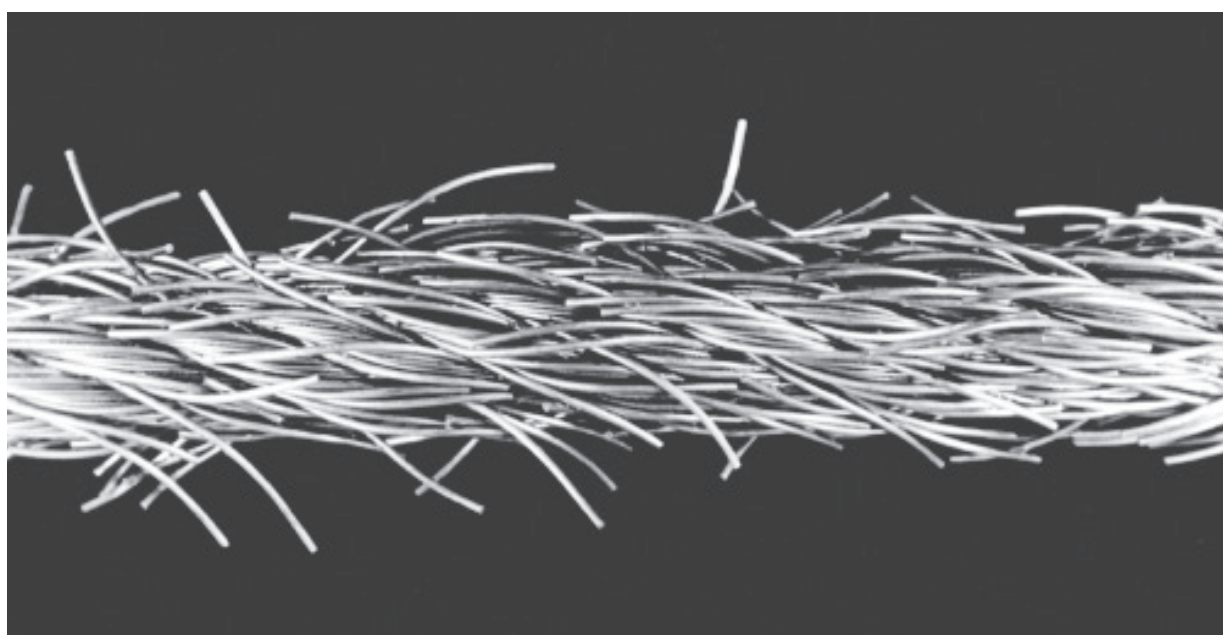
**Wizualna Kontrola Liny Stalowej =
20% Pewności + 80% Nadziei**

Niestety często zdarza się, że widoczne 20% metalicznego przekroju poprzecznego, prezentuje się w dobrym stanie, podczas gdy w niewidocznej części liny stalowej, ukryta jest duża liczba pęknięć drutów liny. Liny stalowe, wykazujące wewnętrzne pęknięcia i żadnych zewnętrznych pęknięć drutów, są bardzo niebezpieczne.

3.1. Problem: wewnętrzne pęknięcia drutów w 6-splotkowej linie z rdzeniem stalowym

W trakcie badania liny stalowej 6 × 36 typu Warrington-Seale z rdzeniem stalowym (rys. 6), nie można było zidentyfikować żadnych zewnętrznych pęknięć drutów. Po ręcznie wykonanym zgięciu liny stalowej okazało się, że każdy pojedynczy drut zewnętrzny uległ pęknięciu we wnętrzu liny (rys. 7).

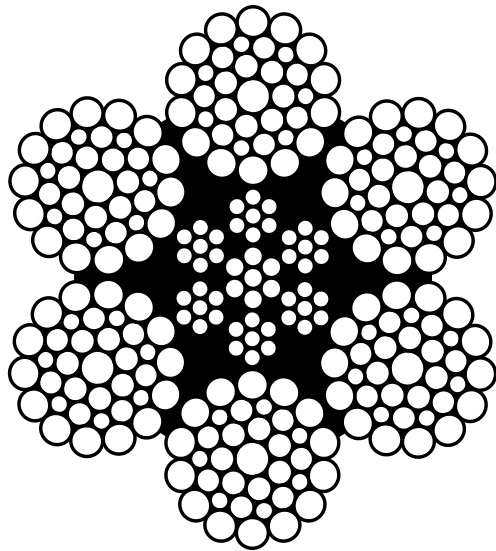
Miejsca skrzyżowania pomiędzy rdzeniem stalowym a zewnętrzną splotką charakteryzują się bardzo wysoką lokalną koncentracją naprężeń (rys. 8). Dlatego też druty zewnętrzne liny stalowej na punktach styku z rdzeniem stalowym mogą pękać. Na rys. 7 wyraźnie widać, że swobodną długość pękniętych drutów.



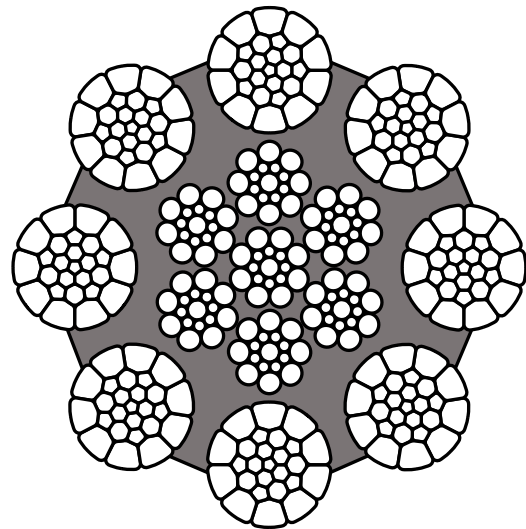
Rys. 6: Liczne pęknięcia drutów w miejscach styku drutów zewnętrznych z rdzeniem stalowym.

3.2. Rozwiązanie: 8-splotkowe liny z pośrednią wkładką z tworzywa sztucznego

Na rys. 9 pokazano przekrój poprzeczny 8-splotkowej liny z pośrednią wkładką z tworzywa sztucznego pomiędzy rdzeniem stalowym a splotkami zewnętrznymi (Casar Turboplast). Warstwa z tworzywa sztucznego nie tylko uszczelnia smar linowy i chroni rdzeń przed korozją, ale także zapobiega kontaktowi metal-metal pomiędzy rdzeniem stalowym a splotkami zewnętrznymi, zmniejszając w ten sposób naciski na styku między rdzeniem stalowym a splotkami zewnętrznymi (rys. 10). W ten sposób pośrednia wkładka spełnia w pełni swoje zadanie zapobiegając pęknięciom drutów we wnętrzu liny.



Rys. 7: Lina stalowa 6 × 36 typu Warrington-Seale z rdzeniem stalowym



Rys. 8: Bardzo duże koncentracje naprężeń na punktach styku z rdzeniem stalowym (lina 6 × 36 typu Warrington-Seale SES).



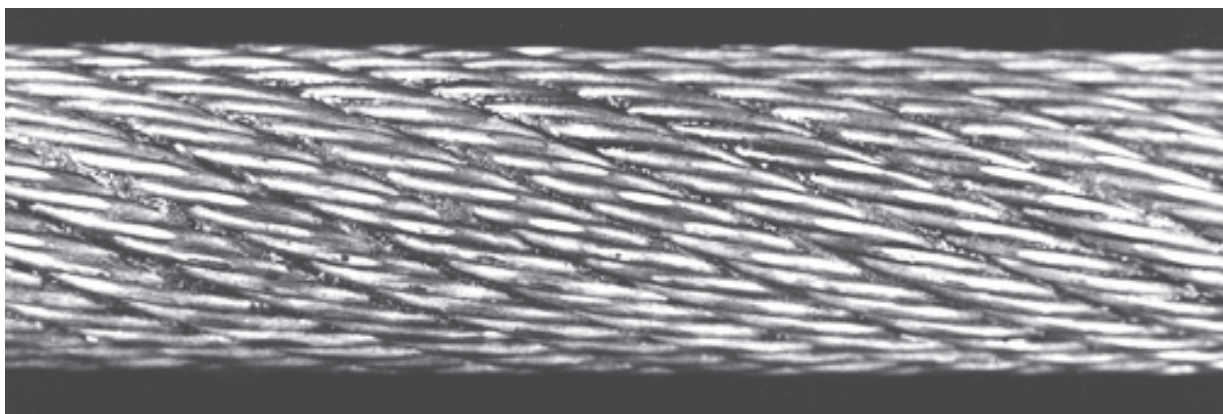
Rys. 9: 8-splotkowa lina z warstwą tworzywa sztucznego pomiędzy rdzeniem stalowym a splotkami zewnętrznymi (6x36 Warrington-Seale IWRC)



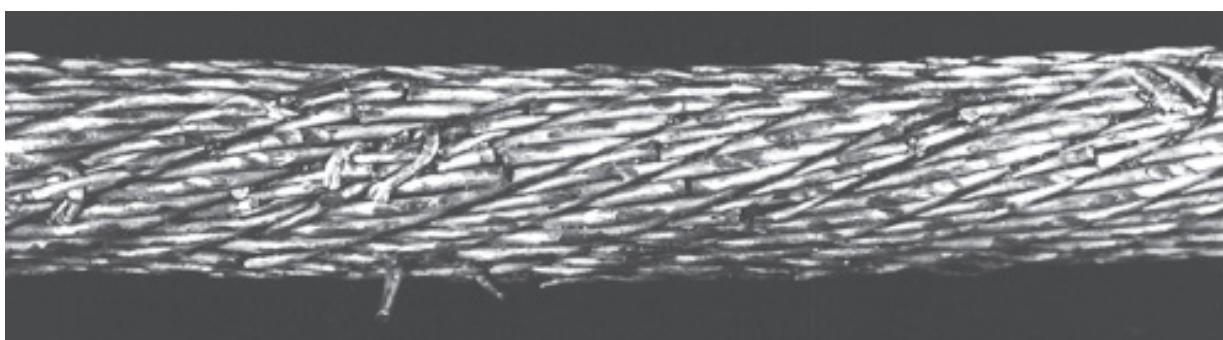
Rys. 10: Pośrednia warstwa z tworzywa sztucznego oddziałuje jak poduszka. Zmniejsza naciski na miejsca podparcia i tym samym zapobiega wewnętrznym pęknięciom drutów

4. Problem: wewnętrzne pęknięcia drutów w konwencjonalnych linach

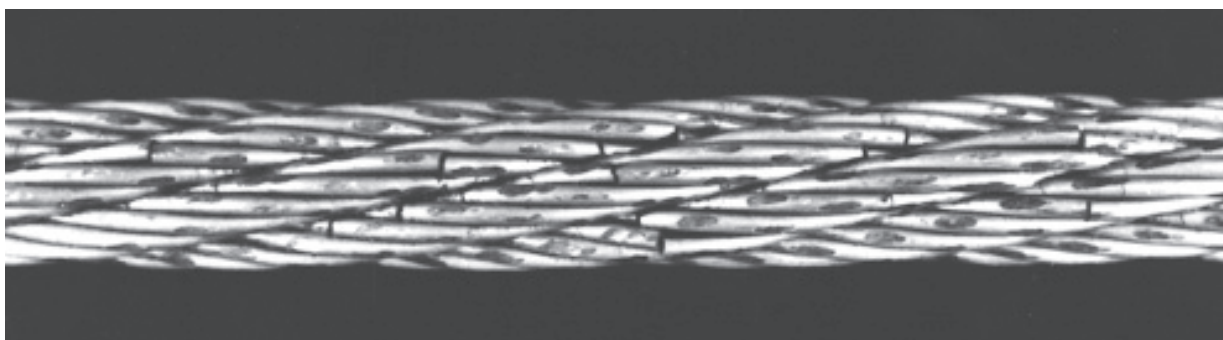
W linach częściowo lub całkowicie nieodkrętnych rdzeń stalowy, zwity jest w kierunku przeciwnym niż kierunek zwicia spletek zewnętrznych. Z tego powodu częściowo lub całkowicie nieodkrętnie liny stalowe, są jeszcze bardziej narażone na niebezpieczeństwo wewnętrznych pęknięć drutów niż 6- lub 8-splotkowe liny stalowe.



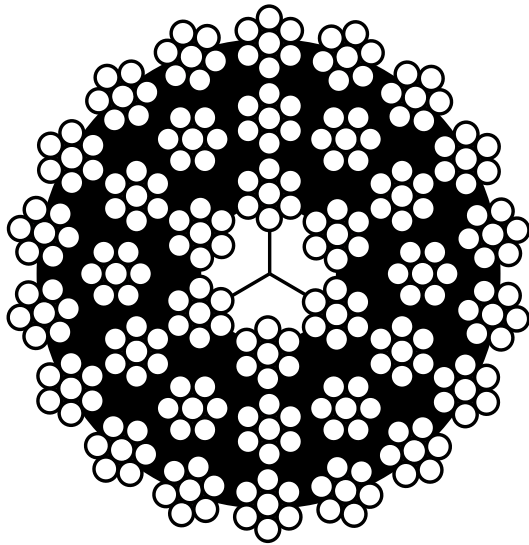
Rys. 11: Lina 36 × 7 po kilku miesiącach eksploatacji. Lina nie wykazuje żadnych, zewnętrznie widocznych pęknięć drutów.



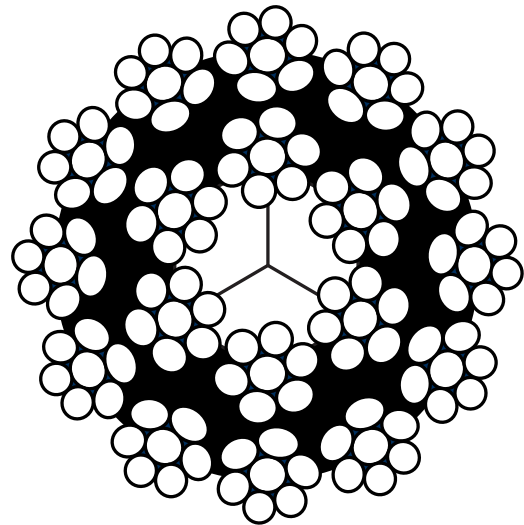
Rys. 12: Po usunięciu spletek zewnętrznych, widocznych jest wiele pęknięć drutów na rdzeniu stalowym w miejscach krzyżowań warstw spletek.



Rys. 13: Najbardziej wewnętrznie położona warstwa spletek wykazuje dużą liczbę pęknięć drutów.



Rys. 14: Lina stalowa dźwignicy częściowo nieodkrętna (36×7).



Rys. 15: Lina stalowa dźwignicy częściowo nieodkrętna (18×7).

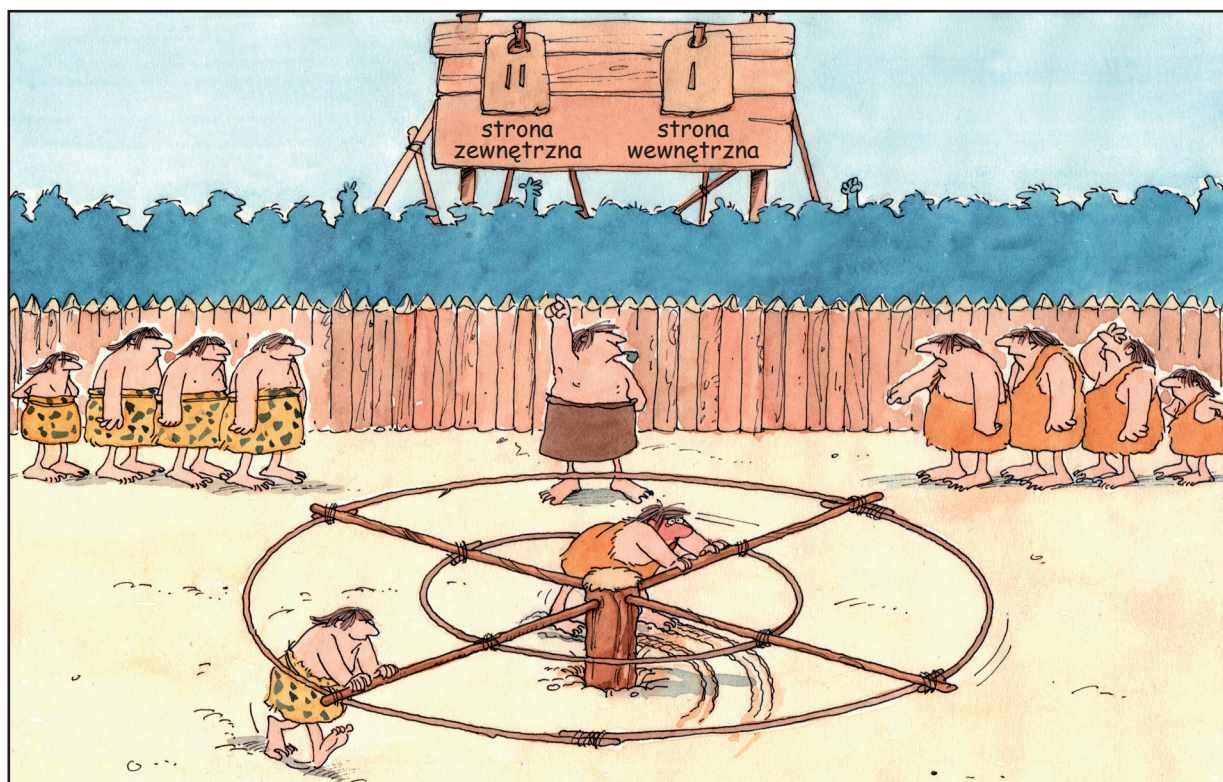
Rys. 14 przedstawia przekrój poprzeczny liny stalowej częściowo nieodkrętniej 36×7 . Rys. 12 natomiast przedstawia zewnętrzną powierzchnię tego rodzaju liny po upływie kilku miesięcy jej eksploatacji. Lina ta nie ma żadnego pojedynczego widocznego pęknięcia drutu.

Po usunięciu zewnętrznej warstwy splotek znajdujemy bardzo wiele pęknięć drutów na powierzchni rdzenia stalowego w miejscach krzyżowań drutów rdzenia stalowego ze splotkami zewnętrznymi (rys. 12). Po usunięciu zewnętrznej warstwy splotek rdzenia stalowego ukazuje się wewnętrzna warstwa splotek rdzenia stalowego, a na niej duża liczba pęknięć drutów (rys. 13).

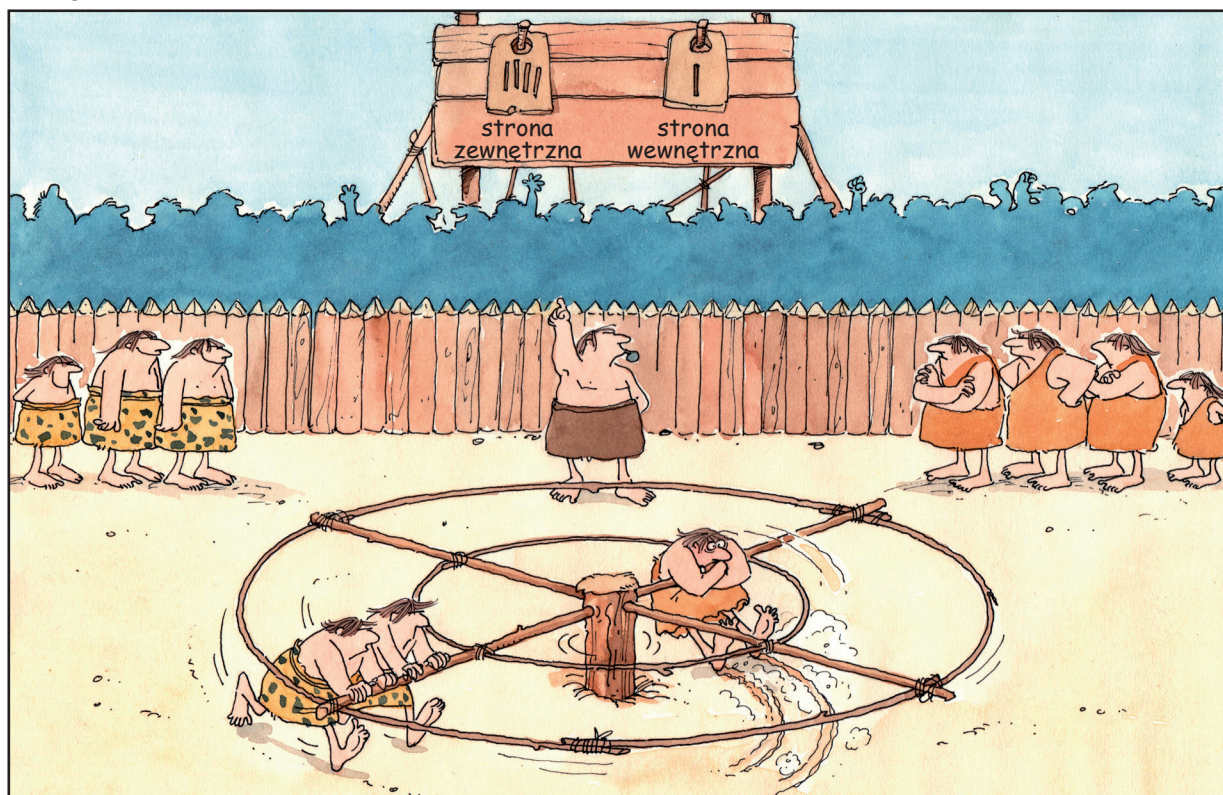
4.1. Wstawka tekstowa (intermezzo): liny stalowe nieodkrętnie

Jeśli liny stalowe konstrukcji 18×7 (rys. 15) lub 19×7 , albo ich wstępnie zgniatane warianty, są stosowane na dźwignicach jako liny nośne, nie należy wówczas liczyć na żadne ubezpieczenie od odpowiedzialności cywilnej!

Takie liny stalowe mają w sobie pewien immanentny problem, jak to przedstawia następujący przykład: dwie grupy sportowców próbują w przejściu obrócić kołowrót w przeciwstawnych sobie kierunkach. Jest to dalece nie fair w walce o współzawodnictwo, bowiem jedna z tych grup uchwyciła na zewnątrz kołowrót i tym samym ma znacznie większą dźwignię, niż wewnątrz atakując ją przeciwnicy (rys. 16).



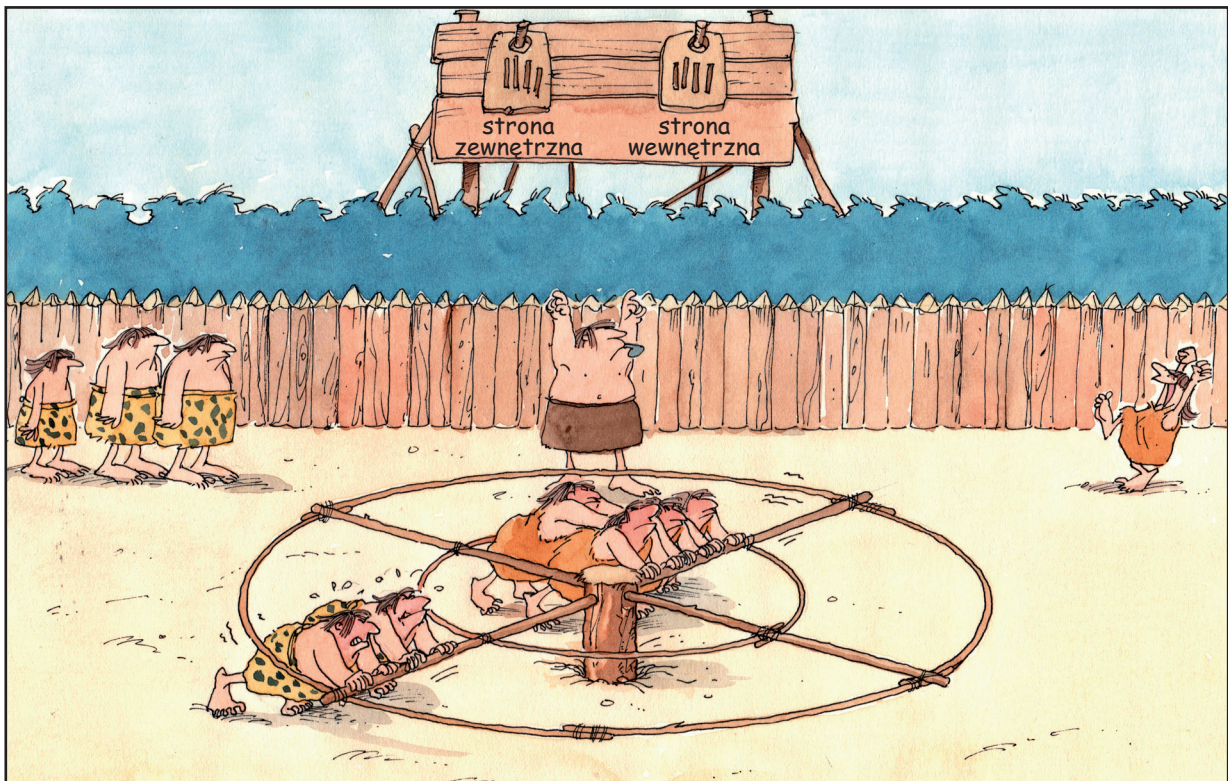
Rys. 16: Zewnętrzne splotki są w korzystniejszym położeniu z uwagi na większe ramiona dźwigni.



Rys. 17: W linii 18 × 7, metaliczny przekrój poprzeczny splotek zewnętrznych jest dwukrotnie większy od przekroju (rdzenia) splotki rdzeniowej.

Jeśli ilość zawodników wewnątrz i na zewnątrz będzie taka sama, wówczas zawodnicy będący wewnątrz nie mają żadnej szansy. O wiele gorzej będzie w sytuacji, kiedy na zewnątrz będzie dwa razy więcej zawodników niż wewnątrz (rys. 17)?

Takie dokładnie warunki panują w linach stalowych 18×7 , 18×19 i ich licznych wariantach. Liny te mają 6 splotek leżących wewnątrz, które muszą się utrzymać na 12 splotkach zewnętrznych o identycznej średnicy i dokładnie tak podwojonych ramionach dźwigni. Tego rodzaju liny mogą być względnie stabilne obrotowo wyłącznie wtedy, kiedy wewnętrzne splotki zostają nadmiernie przeciążone!



Rys. 18: W linach nieodkrętnych poprzeczny przekrój metaliczny liny rdzeniowej jest większy niż metaliczny przekrój poprzeczny splotek zewnętrznych. Dzięki temu zapewniona zostaje równowaga, bez nadmiernego obciążania poszczególnych splotek.

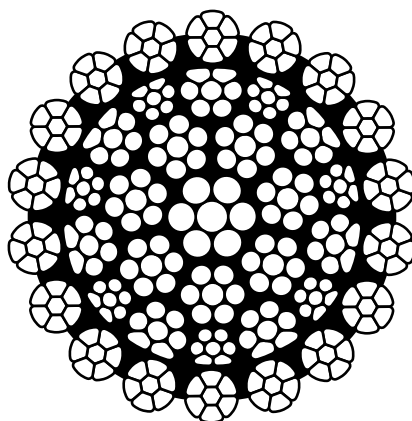
Innymi słowy: we wspomnianych linach stalowych, lina rdzeniowa jest zawsze nadmiernie proporcjonalnie obciążona i dlatego znacznie szybciej zawodzą w niej splotki zewnętrzne. Wewnętrzne pęknięcia drutów są tym samym wstępnie zaprogramowane już poprzez samą konstrukcję liny. Rys. 18 pokazuje, jak powinna zostać wytworzona stabilność obrotów. Atletów we wnętrzu, którzy mają krótszą dźwignię, powinno być więcej niż atletów na zewnątrz z dłuższą dźwignią kołowrotu.

I właśnie w ten sposób dobre, odporne na rotację liny osiągają stabilność bez przeciążania rdzenia liny: przekrój metalowy ich rdzenia jest znacznie większy niż przekrój metalowy splotek zewnętrznych.

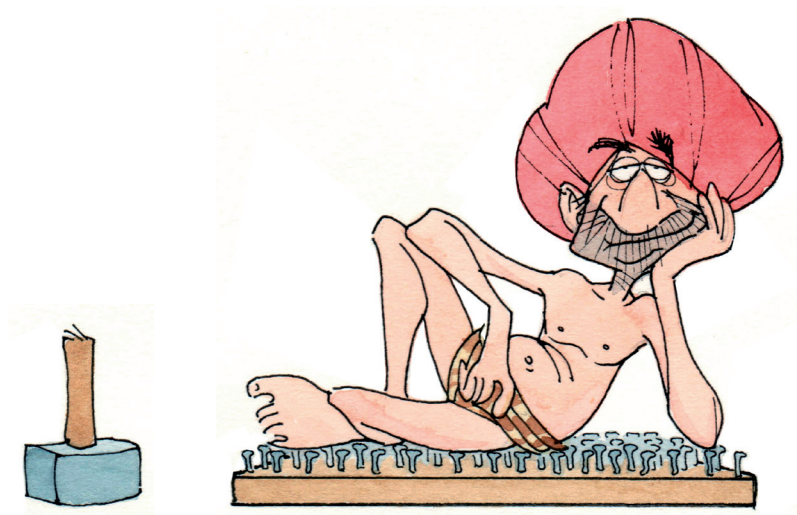
4.2. Rozwiązanie: Nieodkrętnie specjalne liny stalowe z plastycznie odkształcanym rdzeniem i plastycznie odkształcanymi splotkami zewnętrznymi

Rys. 19 przedstawia przekrój poprzeczny 40-splotkowej nieodkrętniej liny stalowej z plastycznie odkształconą liną rdzeniową i z plastycznie odkształconymi splotkami zewnętrznymi (Casar Eurolift). Plastyczne odkształcenie liny rdzeniowej – jako całości – prowadzi do zwiększenia siły zrywającej i do większej stabilizacji obrotowej liny. Ponadto zwiększona powierzchnia styku splotek zewnętrznych gwarantuje na linie rdzeniowej zmniejszone naciski w miejscach przylegania (rys. 20) i zmniejsza w konsekwencji zagrożenia związane z pęknięciami drutów.

Nieodkrętnie liny stalowe powinny być zalecane do stosowania do zbloczy z krętlikiem.



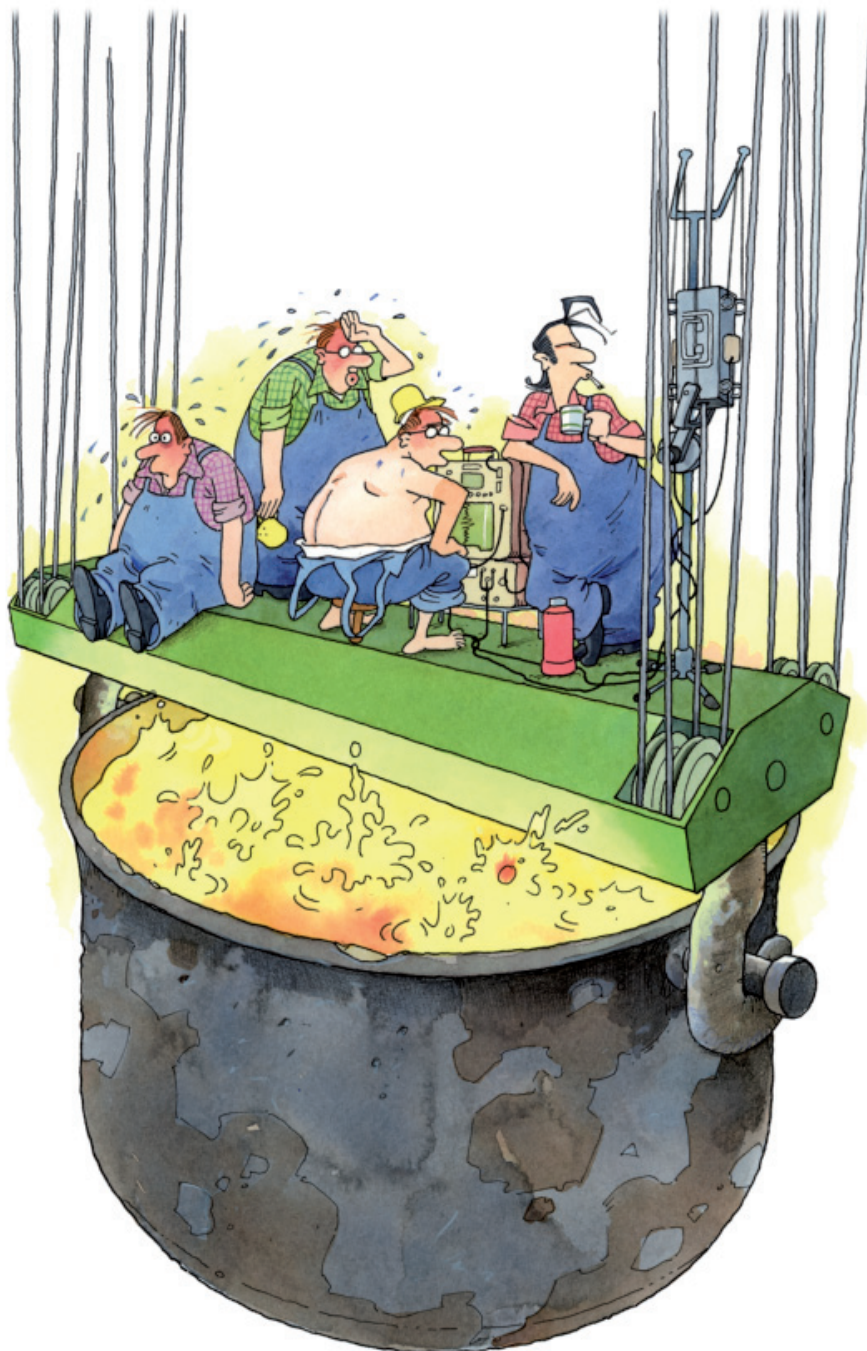
Rys. 19: 40-splotkowa nieodkrętna lina nośna dźwignicy z plastycznie odkształcanymi splotkami zewnętrznymi i z plastycznie odkształconą liną rdzeniową.



Rys. 20: Zwiększone powierzchnie przylegania na spłaszczonej linie rdzeniowej zmniejszają naciski pomiędzy liną rdzeniową a plastycznie odkształconymi i wygładzonymi splotkami zewnętrznymi, zmniejszając w ten sposób niebezpieczeństwo powstawania wewnętrznych pęknięć drutów.

5. Magnetyczne badanie lin stalowych

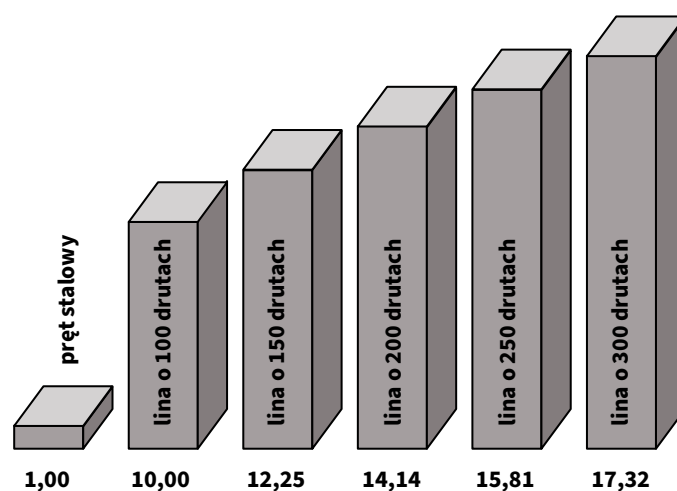
Całkowita powierzchnia wszystkich drutów, z których skonstruowana jest lina stalowa, jest mniej więcej 16 razy większa od powierzchni stalowego pręta z porównywalnym metalowym przekrojem poprzecznym (rys. 22). Oznacza to, że w środowisku korozyjnym, lina będzie korodować 16 razy szybciej niż pręt stalowy, jeśli nie zostaną podjęte odpowiednie działania.



Rys. 21: Magnetyczne badania lin stalowych pod obciążeniem.

6. Problem: korozja lin stalowych

Całkowita powierzchnia wszystkich drutów, z których skonstruowana jest lina stalowa, jest mniej więcej 16 razy większa od powierzchni stalowego pręta z porównywalnym metalowym przekrojem poprzecznym (rys. 22). Oznacza to, że w środowisku korozyjnym, lina będzie korodować 16 razy szybciej niż pręt stalowy, jeśli nie zostaną podjęte odpowiednie działania.



Rys. 22: Suma powierzchni drutów liny stalowej jest około 16 razy większa od powierzchni pręta stalowego o porównywalnym metalicznym przekroju poprzecznym.

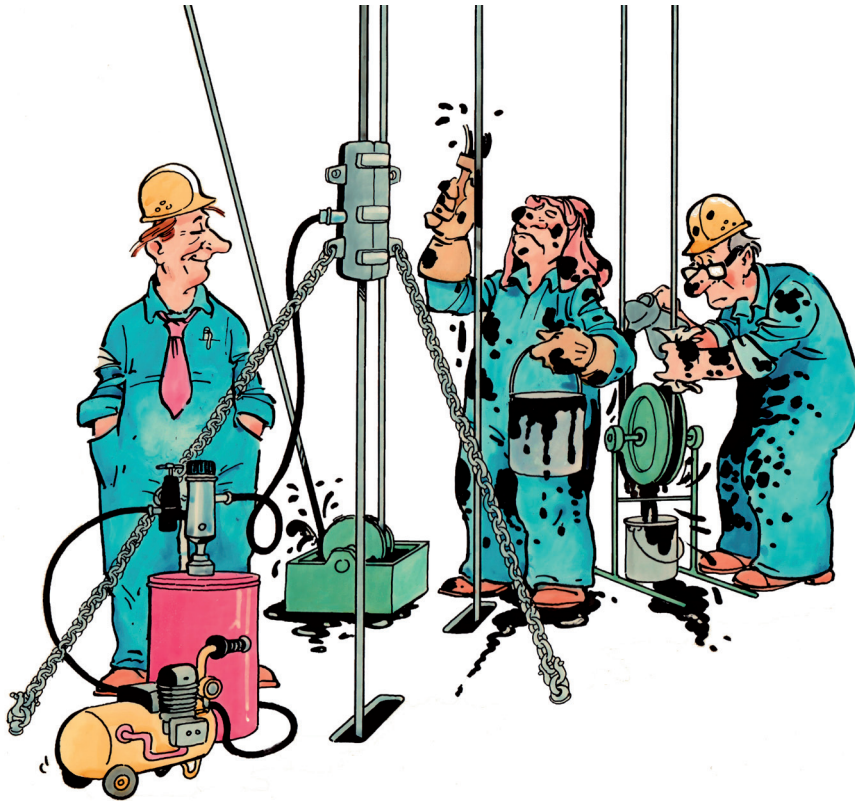
6.1. Rozwiązanie 1: ocynkowane druty i rdzenie stalowe w osłonach z tworzywa sztucznego

Liny stalowe przeznaczone do stosowania w środowisku korozyjnym powinny być wykonane z drutów ocynkowanych. Nawet jeśli powłoka cynkowa ulegnie miejscowemu przetarciu, odsłonięte fragmenty drutu będą chronione poprzez cynk z sąsiednich drutów (ochrona katodowa).

Rdzeń liny powinien być dodatkowo pokryty tworzywem sztucznym. Plastikowa powłoka utrzyma smar wewnątrz rdzenia i zapobiegnie przedostawaniu się czynników korozyjnych.

6.2. Rozwiązanie 2: regularne smarowanie uzupełniające

Liny stalowe w miarę upływu czasu ich eksploatacji tracą coraz bardziej ich warstwę cynkową. Poza tym na linach stalowych zużywany jest coraz bardziej środek smarny. Dlatego liny stalowe – w okresie eksploatacji – w regularnych odstępach czasu powinny być dosmarowywane tak, ażeby zmniejszyć tarcie pomiędzy elementami liny i chronić jej powierzchnię przed korozją. Rys. 23 przedstawia różne metody powtórne-go, uzupełniającego smarowania lin stalowych.



Rys. 23: Uzupetniające smarowanie lin stalowych.

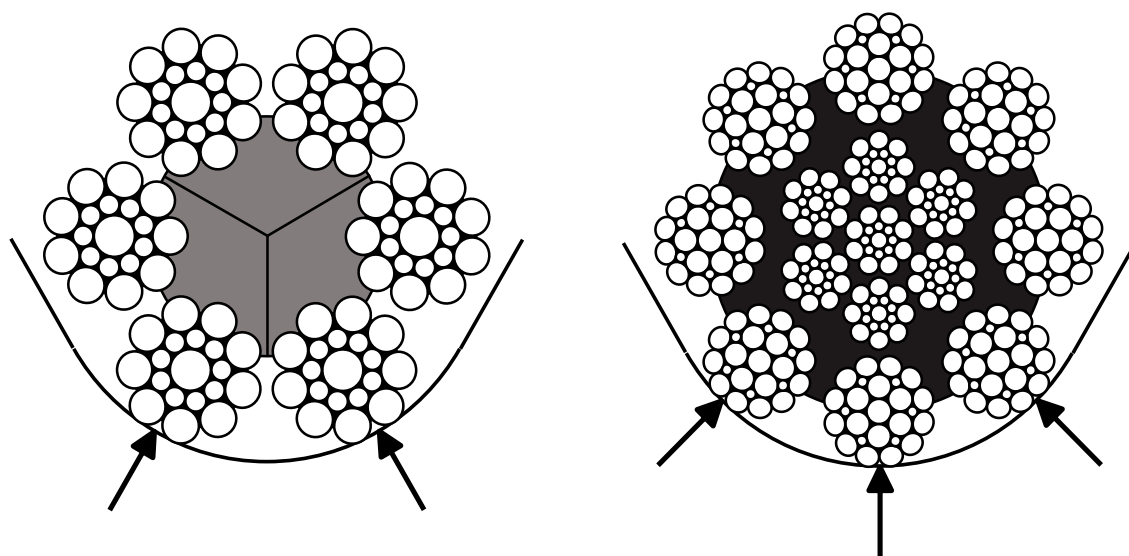
7. Problem: niezadowalający okres użytkowania lin stalowych

Liny dźwignicowe narażone są w trakcie eksploatacji na przemienne obciążenia zginające oraz rozciągające obciążenia tętniące. Nierzadko ich wytrzymałość zmęczeniowa nie odpowiada oczekiwaniom eksploatujących.

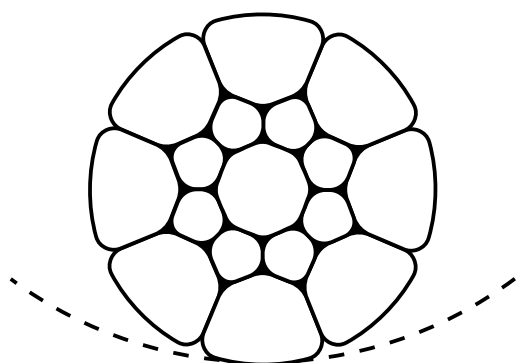
7.1. Rozwiązanie 1: liny stalowe o podwyższonej wytrzymałości zmęczeniowej

Liny stalowe różnych konstrukcji mają bardzo różne trwałości zmęczeniowe. Z powodu większej liczby elementów tych lin i ich większej liczby punktów styku bądź przylegania w rowku linowym – w efekcie powodujących mniejsze naciski powierzchniowe liny 8-splotkowe przy zmiennych obciążeniach zginających są znacznie trwalsze niż liny 6-splotkowe (rys. 24).

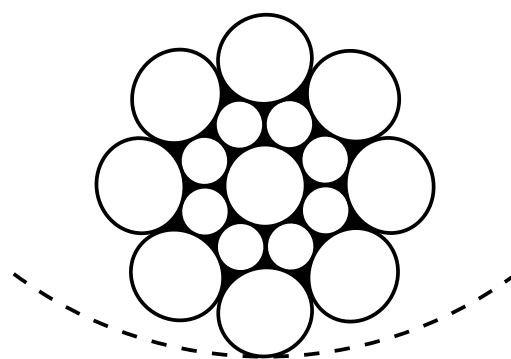
Liny stalowe z plastycznie odkształcanymi splotkami zewnętrznymi (rys. 25) mają większy metaliczny przekrój poprzeczny aniżeli podobne liny stalowe, wykonane z konwencjonalnych splotek. Pracują one przy identycznym zewnętrznym obciążeniu pod niższym względnym naprężeniem rozciągającym. Mają znacznie korzystniejsze podparcie na rowku linowym aniżeli liny stalowe z konwencjonalnymi splotkami (rys. 26).



Rys. 24: Ze względu na większą liczbę punktów przylegania drutów w rowku linowym oraz wynikające stąd mniejsze naciski, 8-splotkowe liny stalowe (np. Casar Stratoplast, po stronie prawej) mają większą trwałość zmęczeniową na zginanie przy obciążeniu przemiennym aniżeli 6-splotkowe liny druciane (z lewej strony).



Rys. 25: Good contact conditions for compacted outer strand



Rys. 26: Bad contact conditions for conventional outer strands

Dlatego liny stalowe z plastycznie odkształcanymi splotkami zewnętrznymi, charakteryzują się zazwyczaj dłuższym okresem eksploatacji niż liny stalowe wykonane ze splotek konwencjonalnych.

Liny stalowe z pośrednimi wkładkami z tworzywa sztucznego pomiędzy rdzeniem stalowym a splotkami zewnętrznymi przy zmiennych obciążeniach zginających są nie tylko trwalsze od podobnych lin bez wkładek pośrednich z tworzywa sztucznego, ale także wykazują znacznie wyższą trwałość zmęczeniową w warunkach obciążeń zmiennych.

W trakcie działania obciążenia dynamicznego lina stalowa zmniejsza swoją średnicę i tym samym zagęszcza wkładkę pośrednią z tworzywa sztucznego. Zachodzi działanie amortyzujące i zmniejszające naprężenia szczytowe w drutach lin stalowych. Ponieważ siły dynamiczne w normalnych warunkach przenoszone są poprzez linę stalową na dźwignicę, tego rodzaju wbudowany amortyzator nie tylko wpływa na dłuższy okres eksploatacji liny stalowej, ale redukuje również znacznie siły dynamiczne, działające na pozostałe elementy konstrukcyjne dźwignicy.

7.2. Rozwiązanie 2: optymalizacja średnicy liny

Profesor Feyrer z Uniwersytetu ze Stuttgartu wyprowadził wzór na wstępne obliczenie czasookresu trwałości liny stalowej.

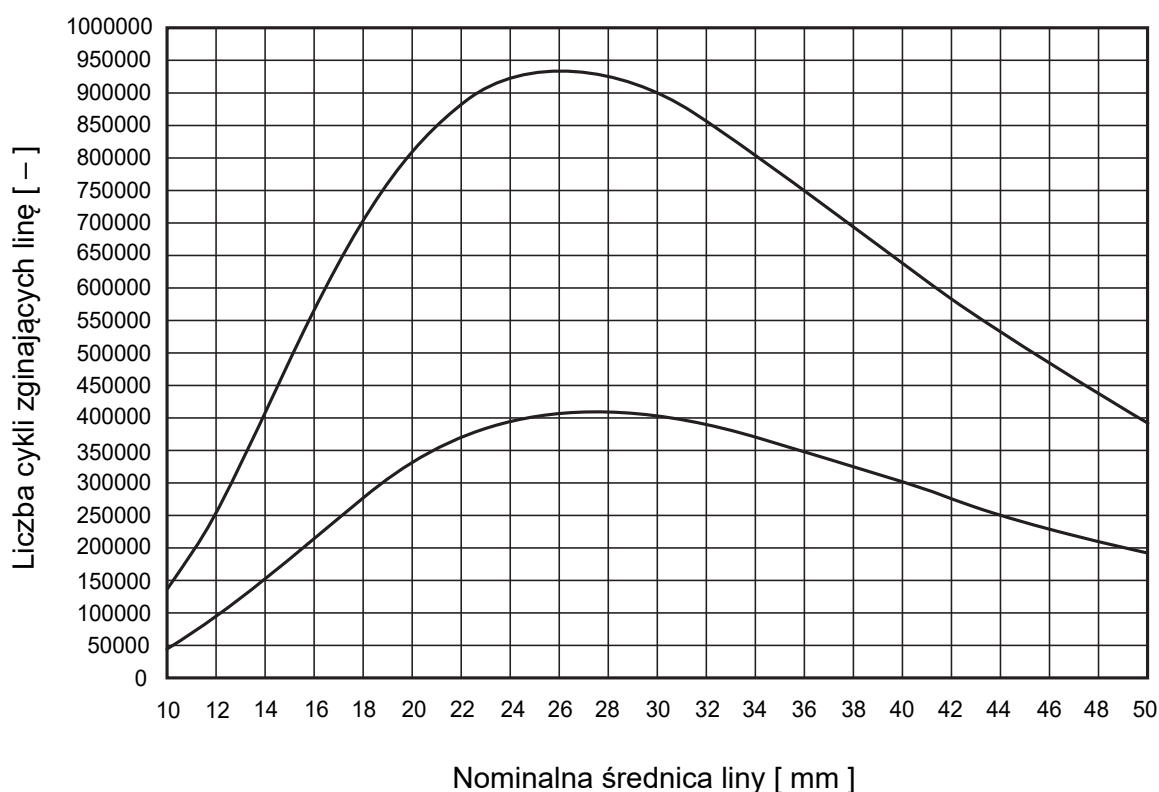
$$\lg N = b_0 + (b_1 + b_3 \cdot \lg \frac{D}{d}) \cdot (\lg \frac{S}{d^2} - 0.4 \cdot \lg \frac{R_o}{1770}) + b_2 \cdot \lg \frac{D}{d} + \lg f_d + \lg f_L + \lg f_E$$

Parametry specyficzne dla określonej liny stalowej, od b_0 aż do b_5 – muszą zostać wyznaczone przy dużej liczbie prób zmęczenia na zginanie dla każdej poszczególnej konstrukcji lin. Parametry są tymczasem znane dla większej liczby standardowych lin i lin specjalnych CASAR.

Autor tej publikacji napisał program, który oblicza trwałość liny stalowej, aż do stanu kwalifikującego ją do wymiany i aż do zerwania, w zależności od wybranej konstrukcji liny, średnicy nominalnej liny, średnicy krążka linowego i obciążenia ciągłego. Jeżeli znana jest geometria i warunki pracy dźwignicy, to liczba cykli, aż do stanu kwalifikującego ją do wymiany i aż do zerwania liny stalowej może zostać wcześniej określona.

Nawet jeśli bezwzględna liczba cykli zmian zginania nie stanowi zainteresowania, to program ten można stosować dla celów wzajemnego porównywania przebiegów zmęczenia różnych konstrukcji lin w określonych warunkach. Program oferuje ponadto możliwość obliczania Optymalnej Średnicy Nominalnej liny. Rys. 27 pokazuje trwałość zmęczeniową - liczbę cykli zmian obciążeń zginających aż do stanu liny kwalifikującego ją do wymiany (dolna krzywa) i aż do zerwania liny (krzywa górna) w zależności od średnicy nominalnej liny, obciążenia ciągłego wynoszącego 40 000 N i średnicy rowka liniowego – 600 mm.

Lina o średnicy nominalnej równej 10 mm już po 50 000 zmian obciążeń na zginanie kwalifikuje się do wymiany. A mianowicie stosunek średnicy koła linowego do średnicy nominalnej liny (iloraz D/d) wynosi 60 i jest korzystny dla liny 10 mm, ale – jest rzeczą oczywistą, że obciążenie równe 40 000 N jest zbyt duże jak na linę o tak małej średnicy.



Rys. 27: Liczba zmian przy próbie zmęczeniowej zginania aż do stanu dyskwalifikacji (dolna krzywa) aż do momentu przetomu (górna krzywa) w zależności od średnicy nominalnej liny.

Jeżeli średnica liny zostanie podwojona do wartości 20 mm, wzrasta liczba przegięć do 340 000, a więc niemalże o 7-krotną wartość pierwszego wyniku. Iloraz D/d uległ zmniejszeniu, do 30, lecz metaliczny przekrój liny uległ zwielokrotnieniu i specyficzne naprężenia rozciągające odpowiednio zredukowane.

Lina 20 mm może lepiej unieść obciążenie ciągłe równe 40 000 N, pomimo zmniejszonego ilorazu D/d , i zachować się lepiej niż lina o średnicy 10 mm.

Kiedy średnica liny zostanie podwojona do 40 mm, liczba cykli przegięć, nie ulega – jednak – dalszemu wzrostowi. Lina 40 mm wykonała 300 000 zmian przegięć. Jest to wynik nieco gorszy niż uzyskano z liną o średnicy 20 mm.

Lina 40 mm ma metaliczny przekrój poprzeczny, który jest 16 razy większy od przekroju liny 10 mm. Nie ulega ona zmęczeniu z powodu ciągłego obciążenia równego 40 000 N, lecz ze względu na iloraz D/d , który zmniejszył się na bardzo niekorzystną wartość równą 15.

Po lewej części krzywych z rys. 27 liny stalowe mają korzystne ilorazy D/d . Zawodzą one na skutek zbyt dużych naprężeń rozciągających. Po prawej części krzywych liny mają korzystne naprężenia rozciągające. Zawodzą one tutaj na skutek większych naprężeń zginających, wynikających ze zbyt małych ilorazów D/d .

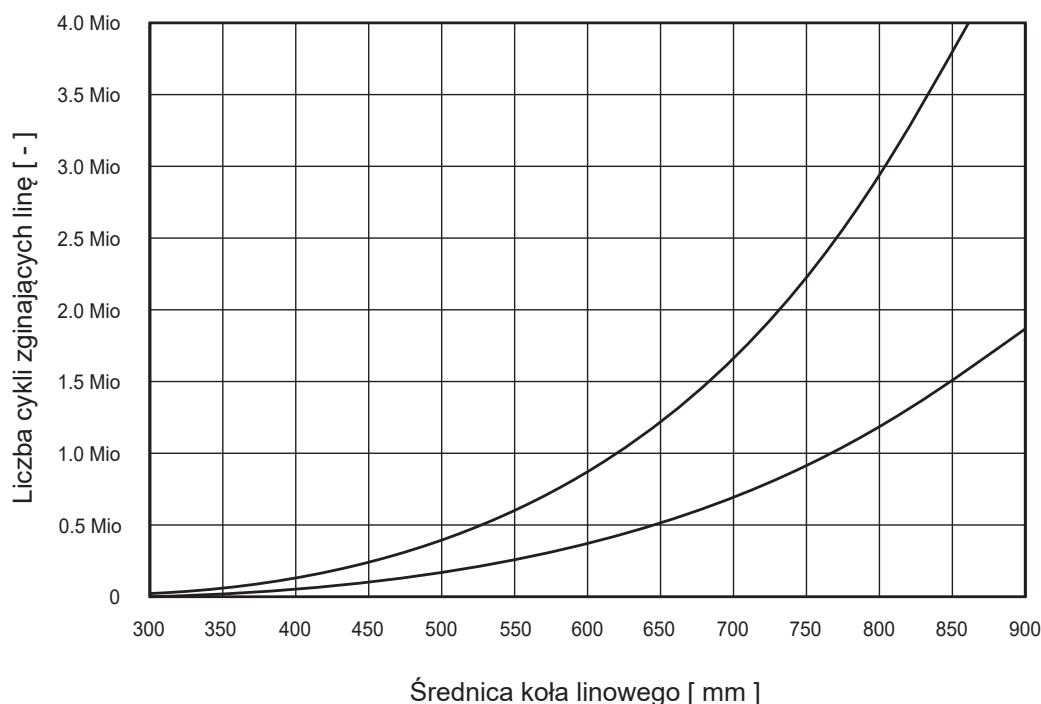
Pomiędzy tymi obydwoma strefami, znajdujemy wartości maksymalne krzywych obrazujących czas okresu eksploatacji przy średnicy nominalnej liny, dla której sumy uszkodzających wpływów od obciążenia ciągłego i naprężeń zginających stają się minimalne.

Gdy średnica liny stalowej dla liczby przegięć osiąga maksimum, wówczas zwana jest optymalną średnicą liny stalowej. Na rys. 27 optymalna średnica nominalna wynosi 27 mm. Dla tej średnicy nominalnej liny stalowej uzyskiwana będzie średnia liczba zmian przegięć, wynosząca 410 000 aż do chwili stanu kwalifikującego ją do wymiany.

Konstruktor dźwignic nie powinien dokonywać wyboru żadnej nominalnej średnicy liny stalowej, większej niż optymalna średnica nominalna takiej liny. Mógłby jedynie ponieść większe koszty za krótszy okres eksploatacji. Konstruktor – przeciwnie – powinien dobrać średnicę (φ) nominalną liny, która jest nieco mniejsza aniżeli optymalna średnica nominalna liny: w podanym przez nas przykładzie (rys. 27) lina o średnicy nominalnej równej 24 mm, mogłaby osiągnąć identyczny okres eksploatacji jak lina o średnicy nominalnej 27 mm.

Lina średnicy 24 mm jest jednak o 10% cieńsza od optymalnej średnicy nominalnej liny. Oznacza to, że przy użyciu bardziej ekonomicznej finansowo liny stalowej, można uzyskać identyczny okres eksploatacji. Ponadto, przy użyciu liny o mniejszej średnicy, można zastosować bęben o znacznie krótszej długości, co z kolei dodatkowo obniża koszty dźwignicy. Najbardziej ekonomiczna nominalna średnica liny jest zawsze mniejsza niż optymalna średnica liny stalowej, określona w zależności od wersji konstrukcyjnej dźwignicy – przykładowo w granicy 90% optymalnej średnicy liny.

W przypadku konstrukcji stalowych „grubszy” oznacza zazwyczaj „trwalszy”. W przypadku lin stalowych nierzadko obowiązuje zasada odwrotna.



Rys. 28: Liczba zmian przegięć zmęczeniowych przy stanie kwalifikacji do jej wymiany (patrz krzywa dolna) oraz aż do momentu zerwania liny (górna krzywa) w zależności od średnicy koła linowego.

7.3. Rozwiązanie 3: optymalizacja średnicy krążka linowego

Poprzez zwiększenie średnicy krążka linowego, można przedłużyć okres eksploatacji lin ruchomych. Wspomniany wyżej program oblicza, o ile musi zostać zwiększona średnica koła linowego, aby uzyskać pożądany rezultat.

Rys. 28 przedstawia liczbę zmian przegięć zmęczeniowych aż do stanu kwalifikującego linę do wymiany (krzywa dolna) i aż do chwili zerwania liny (krzywa górna) w zależności od średnicy krążka linowego. Przy średnicy krążka równej 600 mm, liczba zmian przegięć aż do stanu kwalifikującego linę do wymiany, wynosi 400 000. Po zwiększeniu średnicy krążka linowego przykładowo o 15mm (+25%), następuje wzrost liczby przegięć do wartości 900 000 (+125%).

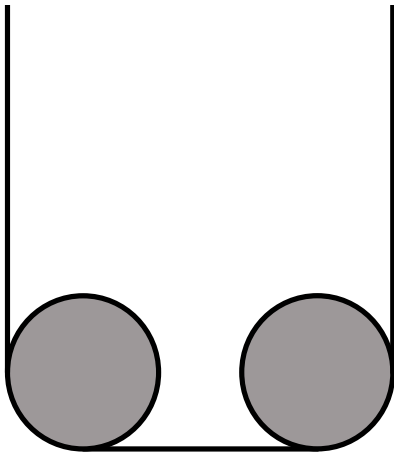
7.4. Rozwiązanie 4: unikanie zbędnych obciążeń zmęczeniowych

Bardzo często liny stalowe nadmiernie ulegają uszkodzeniom pod wpływem zmiennych obciążeń zginających. Jako przykład można tutaj porównać okresy eksploatacji dwóch lin stalowych, które w podobnych warunkach są eksploatowane z wykorzystaniem dwóch różnych zbloczy hakowych dźwignicy.

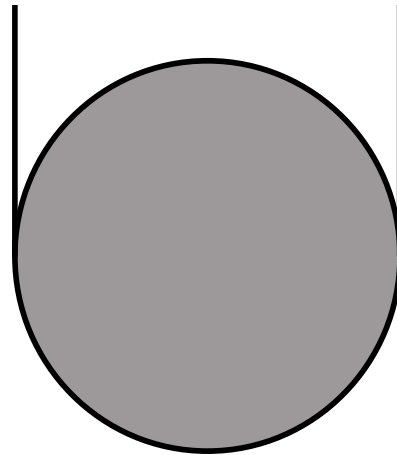
Rys. 29 przedstawia zblocze dźwignicy z dwoma małymi krążkami. Podczas każdej operacji podnoszenia lina przechodząca przez zblocze poddawana jest dwóm cyklom zginania.

Rys. 30 przedstawia zblocze dźwignicy z tylko jednym dużym krążkiem. Podczas każdej operacji podnoszenia lina przechodząca przez zblocze poddawana jest tylko jednemu cyklowi zginania. Sam ten fakt podwoiłby żywotność liny. Średnica krążka jest jednak 2,5 razy większa niż w pierwszym zbloczu, a liczba cykli, które można osiągnąć przy tej dużej średnicy, jest 9 razy większa niż przy małym krążku. W związku z tym żywotność ponownie wzrośnie 9-krotnie, co daje 18-krotnie dłuższą żywotność liny niż w pierwszym przypadku!

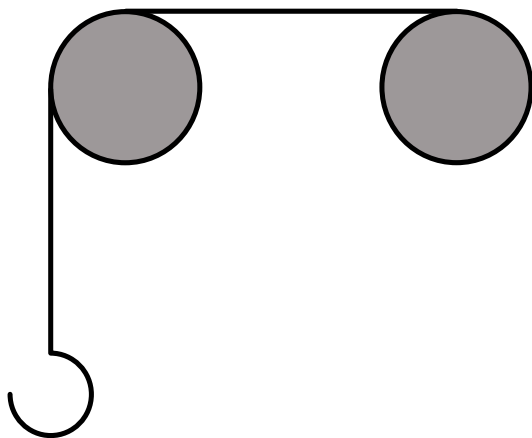
W zależności od warunków brzegowych dwustronne zginanie liny zmęczy linę od 2 do 7 razy bardziej niż jednostronne zginanie liny. Lina wciągnika pokazana na rys. 31 będzie miała zatem od 1,5 do 4 razy dłuższą żywotność niż lina wciągnika pokazana na rys. 32.



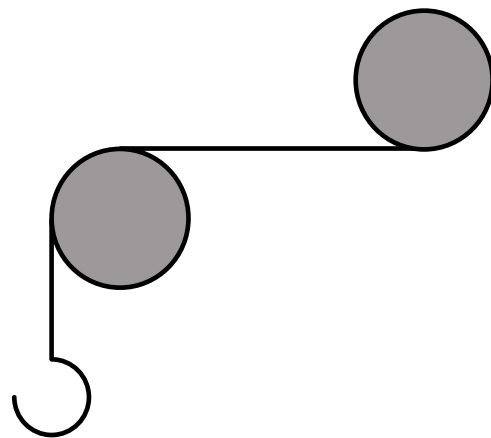
Rys. 29: Zblocze hakowe z dwoma małymi krążkami linowymi.



Rys. 30: Zblocze hakowe z jednym dużym krążkiem linowym.



Rys. 31: Mechanizm podnoszenia dźwignicy z jednostronnie zmiennym przeginaniam.



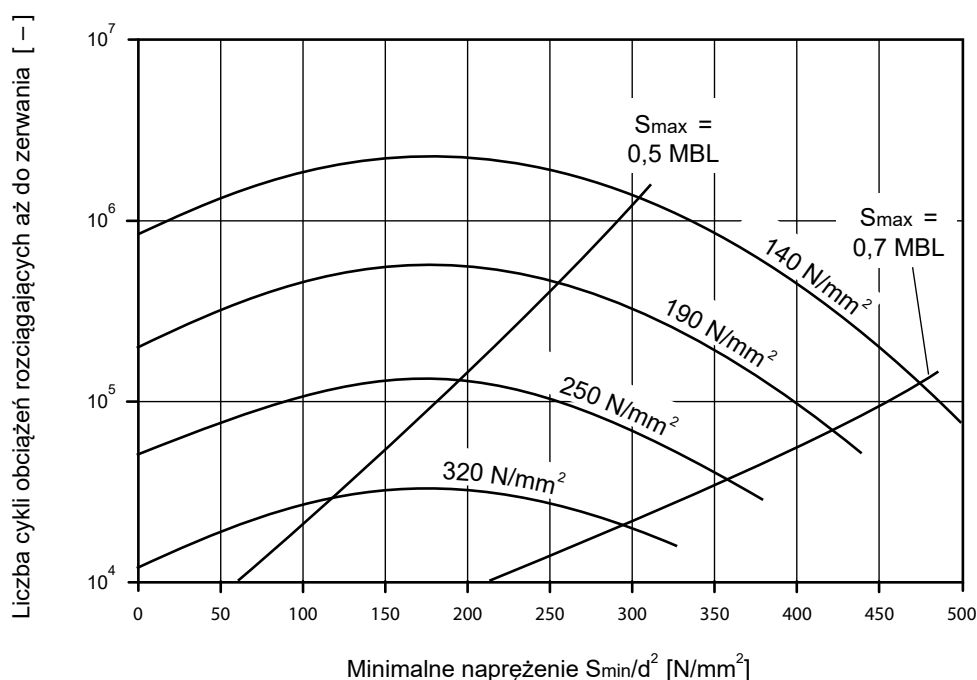
Rys. 32: Mechanizm podnoszenia dźwignicy z dwustronnie zmiennym przeginaniam.

7.5. Rozwiązanie 5: optymalizacja wytrzymałości zmęczeniowej liny przy rozciągających obciążeniach tętniących poprzez zmniejszenie średnicy liny stalowej

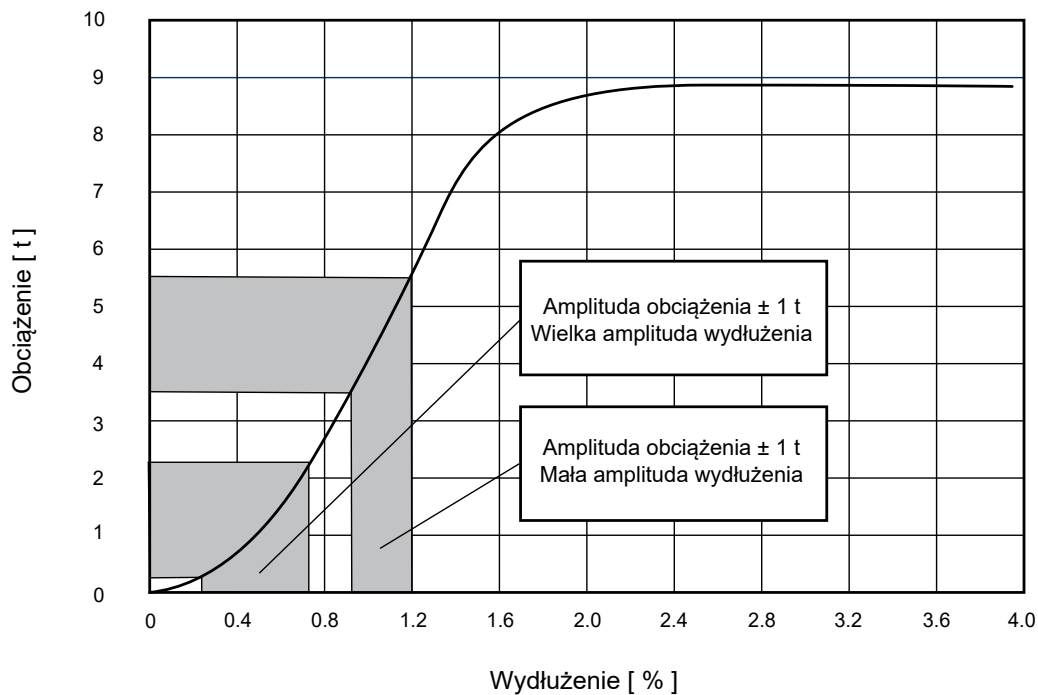
W przypadku prób wytrzymałościowych przy obciążeniach tętniących, od zerowo do dodatnich z określoną amplitudą obciążenia, czas eksploatacji określonej próbki ulega skróceniu wraz z rosnącym naprężeniem średnim.

Próby wytrzymałościowe przy obciążeniach tętniących, od zerowo dodatnich, przeprowadzone na Uniwersytecie w Stuttgarcie, wskazują jednakże, że liny stalowe aż do sumarycznego obciążenia wynoszącego około 50% siły zrywającej linę, oddziałują dokładnie przeciwnie. Czas eksploatacji lin stalowych wzrasta wraz ze wzrastającym średnim naprężeniem (rys. 33).

Amplitudy wydłużenia względnego są przy identycznych amplitudach obciążeniowych znacznie mniejsze dla większych średnich obciążeń. Wyjaśnienie tego zjawiska mogłoby być takie, że lina stalowa nie jest masywną próbką badawczą. Liny stalowe stanowią raczej zespolenie wielu elementów, które podczas zmian obciążenia mogą i muszą poruszać się względem siebie.



Rys. 33: Wraz ze wzrastającym średnim naprężeniem aż do sumarycznego obciążenia równego 50%, siły zrywającej, liny stalowe osiągają wyższe skoki oscylacyjne.



Rys. 34: Typowy wykres rozciągania (obciążenie-wydłużenie względne). Wskutek obciążenia. Amplitudy wydłużenia względnego są przy identycznych amplitudach obciążeniowych znacznie mniejsze dla większych średnich obciążeń..

Jak widać z typowego wykresu rozciągania liny stalowej (rys. 34), wydłużenia względne liny i tym samym względne wzajemne przemieszczenia elementów liny, są o wiele mniejsze dla niskich średnich naprężeń aniżeli dla większych średnich naprężeń. Dla silnie obciążonych lin stalowych, a więc przykładowo dla lin odciągowych dźwignic, mogłoby to oznaczać, że czasy eksploatacji lin stalowych mogłyby zostać zwiększone poprzez zastosowanie mniejszych średnic tych lin i mniejszych współczynników bezpieczeństwa.

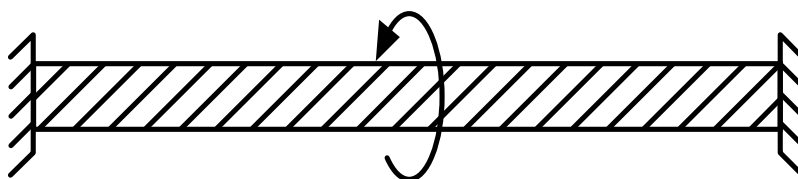
8. Problem: poluzowanie splotek oraz tworzenie się koszy splotkowych

Każdy eksploatujący dźwignicę niejednokrotnie wykrył już na linach stalowych poluzowania splotek lub tworzenie się koszy splotkowych.

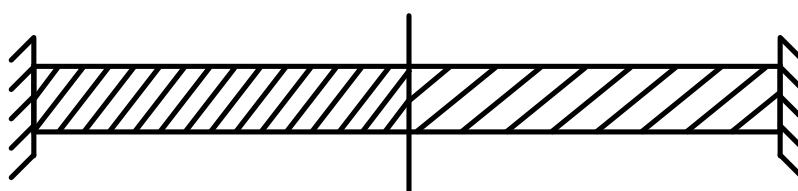
Wyjaśnieniem tego rodzaju deformacji lin są często (nawet jeszcze w starej wersji Norm ISO 4309!) dynamiczne obciążenia lin stalowych. W większości przypadków jednak poluzowania drutów i splotek oraz tworzenie się koszy splotkowych wywoływane zostają przez inne mechanizmy.

Najczęstszą przyczyną poluzowań drutów i splotek, a także tworzenie się koszy splotkowych jest tendencja lin stalowych do skręcania się wokół własnej osi. Rozważmy dla przykładu kawałek liny umocowany na obydwu końcach i zabezpieczony przed rozkręceniem.

Jeżeli taką linę stalową uchwycimy w samym środku i jeden raz obrócimy wokół jej własnej osi (rys. 35), wydłużamy ją po jednej stronie i skracamy po stronie drugiej (rys. 36). W konsekwencji, po jednej stronie zbyt długie będą splotki zewnętrzne (rys. 37), natomiast po drugiej stronie - splotki wewnętrzne (rys. 38).



Rys. 35: Bardzo silne przekręcenie liny stalowej.

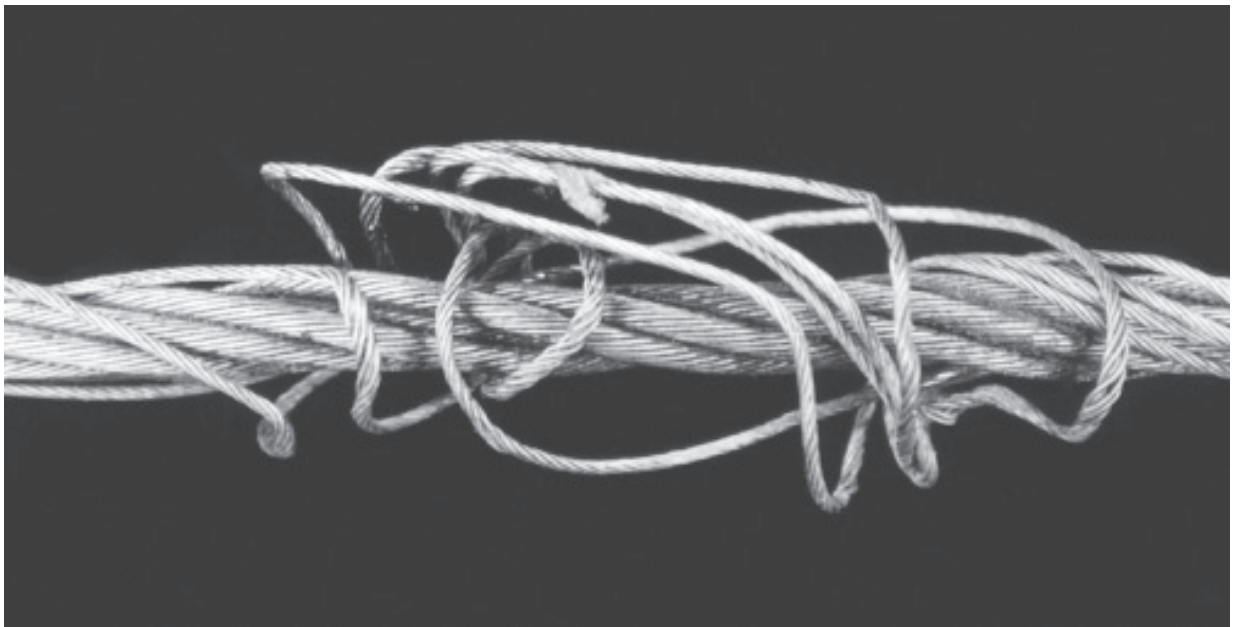


Rys. 36: Skrócenie skoku na jednej stronie (lewo) i wydłużenie się na drugiej stronie (prawo)..

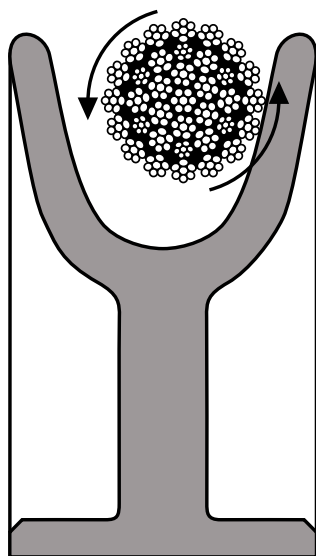
Kiedy lina stalowa zamontowana na dźwignicy może ulec skręceniu wokół własnej osi? Każdy krążek linowy oraz bęben może tego dokonać. Jeżeli lina stalowa nabiega pod pewnym kątem odchylenia na krążek linowy, będzie najpierw dotykać powierzchni rowka krążka linowego, po czym stoczy się na dno rowka linowego (rys. 39). Podczas tego procesu, lina obraca się wokół własnej osi, przy czym zwiększający się kąt odchylenia, zwiększa przekręcenie.



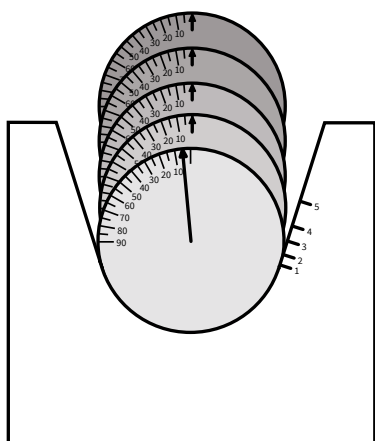
Rys. 37: Wzdłużna koncentracja nadmiarowa splotek zewnętrznych, spowodowana poprzez rozkręcenie liny stalowej.



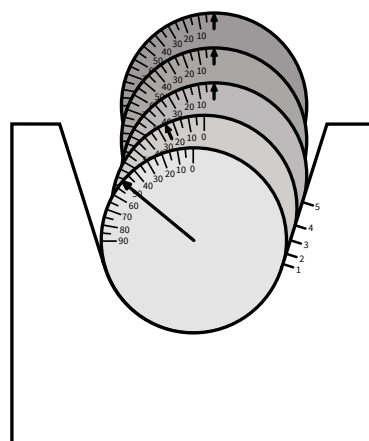
Rys. 38: Wzdłużna koncentracja nadmiarowa splotek wewnętrznych wskutek dokręcenia tej samej liny stalowej.



Rys. 39: Lina stalowa toczy się do dna rowka. Na skutek tego procesu lina ulega przekręceniu.



Rys. 40: Kąt rozwarcia rowków linowych 35° . Niewielkie przekręcenie liny przy kącie odchylenia równym 1° .



Rys. 41: Kąt rozwarcia rowków linowych 35° . Duże przekręcenie liny przy kącie odchylenia 5° .

Rys. 40 i 41 przedstawiają obraz przekrojów poprzecznych lin, które nabiegają na krążek linowy o kącie rozwarcia rowka równym 35° (według Normy US). Jeśli lina stalowa wchodzi do krążka linowego pod kątem 1° , dotyka ona boków krążka linowego w jednym, położonym najniżej punkcie i obraca się zaledwie o 5° .

Jeśli lina stalowa wprowadzana jest do identycznego krążka linowego pod kątem odchylenia 5° , będzie dotykać boku krążka linowego w górnej części i w trakcie toczenia się w dół obróci się o 50° . Oczywiście lina stalowa nie zawsze zachowuje się jak koło zębate na listwie zębatej, toczy się w dół po stronie bocznej. Ruch w dół jest zawsze połączeniem toczenia i ślizgania. Stopień przekręcenia, który przy tym następuje, zależy głównie od tarcia pomiędzy liną a krążkiem linowym.

8.1. Rozwiązanie 1: smarowanie lin

Najprostszym sposobem zmniejszenia współczynnika tarcia pomiędzy liną stalową a krążkiem linowym jest smarowanie liny. Dobrze nasmarowana lina, podczas nabiegania na krążek linowy będzie skręcała się o wiele mniej, niż lina sucha lub skorodowana.

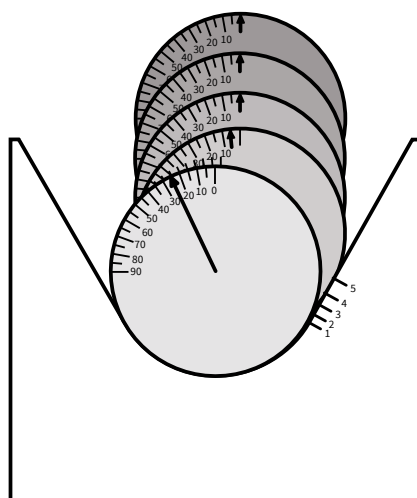
8.2. Rozwiązanie 2: linowe krążki stalowe zamiast krążków linowych z tworzywa sztucznego

Współczynnik tarcia pomiędzy stalą a tworzywem sztucznym jest wyższy niż pomiędzy stalą a stalą. W identycznych warunkach geometrycznych lina stalowa na krążku stalowym doznaje znacznie mniejszego skręcenia niż na krążku linowym z tworzywa sztucznego. Krążki linowe z tworzywa sztucznego są zalecane do zastosowań w położeniach, gdzie kąt odchylenia liny jest niewielki.

8.3. Rozwiązanie 3: krążki linowe z większymi kątami rozwarcia

Jeśli krążek linowy ma większy kąt rozwarcia, lina stalowa biegnie pod kątem odchylenia o wiele głębiej w rowku linowym, zanim dotknie dna rowka. Rys. 42 pokazuje ciąg przekrojów poprzecznych liny, wchodzących do rowka linowego z kątem rozwarcia wynoszącym 60° pod kątem odchylenia 5° . Lina stalowa dotyka określonej powierzchni nośnej w położeniu znacznie niższym niż położenie przedstawione na rys. 39 i przekręcona została jedynie o 25° . Poprzez zwiększenie kąta rozwarcia 35° na 60° , następuje tym samym zmniejszenie rozmiaru przekręcania liny o 50%.

Dlatego krążki linowe powinny mieć kąt rozwarcia wynoszący przynajmniej 45° , zgodnie z normą DIN 15061. Jeszcze lepszy jest kąt rozwarcia wynoszący 52° , zgodnie z normy brytyjską.



Rys. 42: Kąt rozwarcia rowka linowego 60° . Wyraźnie zmniejszone przekręcenie liny przy kącie odchylenia równym 5° .

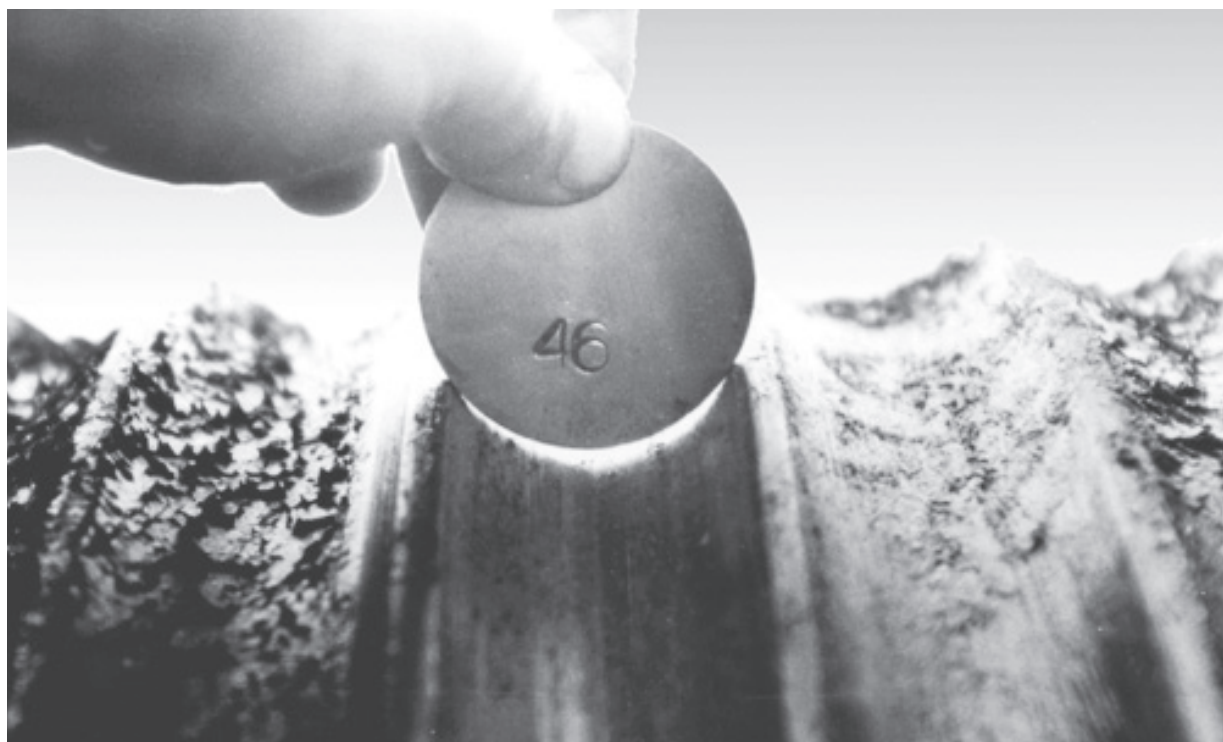
8.4. Rozwiązanie 4: wykorzystanie lin stalowych z pośrednią wkładką z tworzywa sztucznego

Liny stalowe z pośrednią wkładką z tworzywa sztucznego są znacznie bardziej odporne na poluzowania poszczególnych splutek i tworzenie się skręceń koszowych niż liny innych konstrukcji.

8.5. Rozwiązanie 5: unikanie zbyt wąskich rowków linowych

Poluzowania splutek i tworzenie się skręceń koszowych w linach, może być spowodowane zbyt wąskimi rowkami linowymi. Jeżeli promień rowka jest zbyt mały, (rys. 43), wtedy lina stalowa podczas nabiegania na krążek linowy lub bęben linowy ulega ściskaniu. W ostatecznym stadium splotki zewnętrzne są zbyt długie dla zmniejszonej średnicy liny, zaś nadmierne długości splutek ulegają przesunięciu do jednego punktu. W tym miejscu (zazwyczaj w punkcie końcowym ruchu) dochodzi do poluzowania splutek lub tworzenia się skręceń koszowych.

Rowek linowy powinien mieć promień w zakresie od 0.53 do 0.54 średnicy nominalnej liny. Jeżeli promień rowka linowego jest mniejszy, krążek linowy lub bęben linowy musi zostać powtórnie obrobiony, lub wymieniony. Jeżeli nie jest to możliwe, powinna zostać użyta lina o identycznej sile zrywającej, lecz mniejszej średnicy, która spełnia wymagane warunki.



Rys. 43: Zbyt wąski rowek linowy.

9. Problem: uszkodzenia mechaniczne lin stalowych na bębnie linowym

Liny stalowe często ulegają mechanicznym uszkodzeniom na bębnie. Pod wpływem kąta odchylenia, lina stalowa nawijana lub odwijana może – przykładowo zostać ściągnięta na sąsiedni zwój liny (rys. 44). Przy tym mogą ulec uszkodzeniu druty zewnętrzne w punktach stykowych.



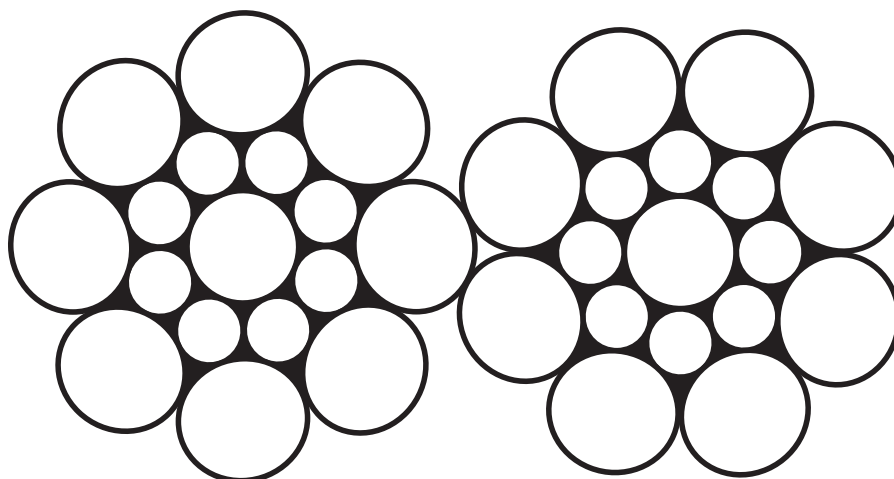
Rys. 44: Pod wpływem kąta odchylenia, lina stalowa ściągana jest na sąsiedni zwój. Druty zewnętrzne ulegają uszkodzeniu w miejscu styku.

9.1. Rozwiązanie 1: rowkowane bębny linowe oraz system nawijania Lebus’a

Zamiast bębnow nierowkowanych zalecane są rowkowane bębny linowe. W przypadku systemu nawijania Lebus’a należy używać nawijania wielowarstwowego.

9.2. Rozwiązanie 2: liny stalowe współzwite z plastycznie odkształconymi splotkami zewnętrznymi

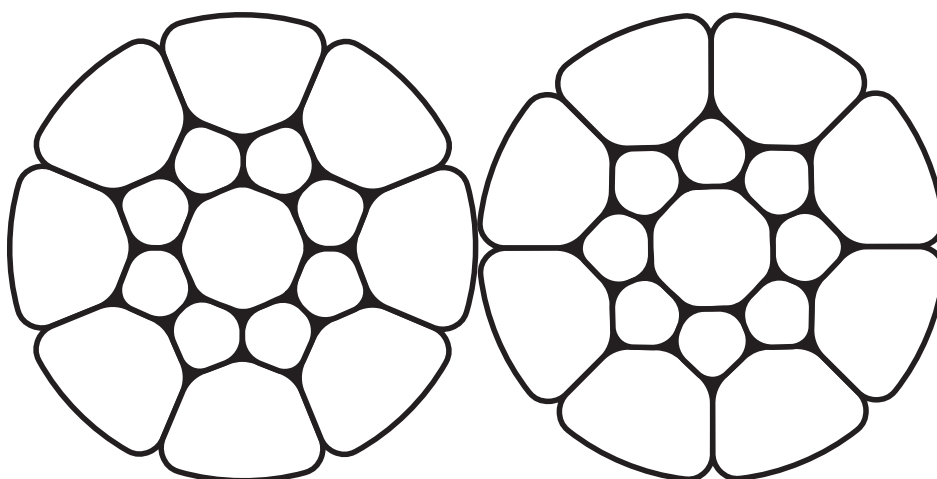
Druty zewnętrzne dwóch sąsiednich zwojów linowych, liny przeciwwzitej, mogą się wzajemnie zazębiać (rys. 45), ponieważ leżą na powierzchni liny w kierunku osi liny. Jeżeli jeden z dwóch zwojów linowych biegnie ku dołowi na bębnie lub ku górze, opuszczając bęben linowy, uszkodzeniom ulegają wzajemnie zazębite druty zewnętrzne.



Rys. 45: Druty zewnętrzne dwóch sąsiednich zwojów liny przeciwwzowej, mogą się wzajemnie zazębiać.

Rys. 46: „Góry” i „doliny” plastycznie odkształcanych splitek zewnętrznych są spłaszczzone i wygładzone. Metaliczny przekrój poprzeczny zostaje zwiększony tak, ażeby lepiej zapobiec ścieraniu się liny i uszkodzeniom mechanicznym.

Przy zastosowaniu liny współzwitej, druty zewnętrzne dwóch sąsiednich zwojów mogą się wzajemnie nie zazębiać, gdyż zostały skierowane w miejscu przylegania na powierzchnię liny, po jednej ze stron ku górze lub po drugiej stronie ku dołowi. Stąd też druty zewnętrzne lin współzwitych ulegają wzajemnie znacznie mniejszym uszkodzeniom przy nawijaniu lub rozwijaniu.



Rys. 46: „Góry” i „doliny” plastycznie odkształcanych splitek zewnętrznych są spłaszczzone i wygładzone. Metaliczny przekrój poprzeczny zostaje zwiększony tak, ażeby lepiej zapobiec ścieraniu się liny i uszkodzeniom mechanicznym.

Plastycznie odkształcane splotki zewnętrzne wykazują kolejne zalety (rys. 46): „Góry” i „doliny” drutów zewnętrznych są spłaszczone i wygładzone. Ponadto druty zewnętrzne wykazują znacznie większy metaliczny przekrój poprzeczny i mają tym samym zwiększoną odporność na ścieranie i uszkodzenia mechaniczne.

Do zastosowania w bębnach z wielowarstwowym nawijaniem lin zalecane są liny stalowe w wersji lin współzwitych z plastycznie odkształcanymi splotkami.

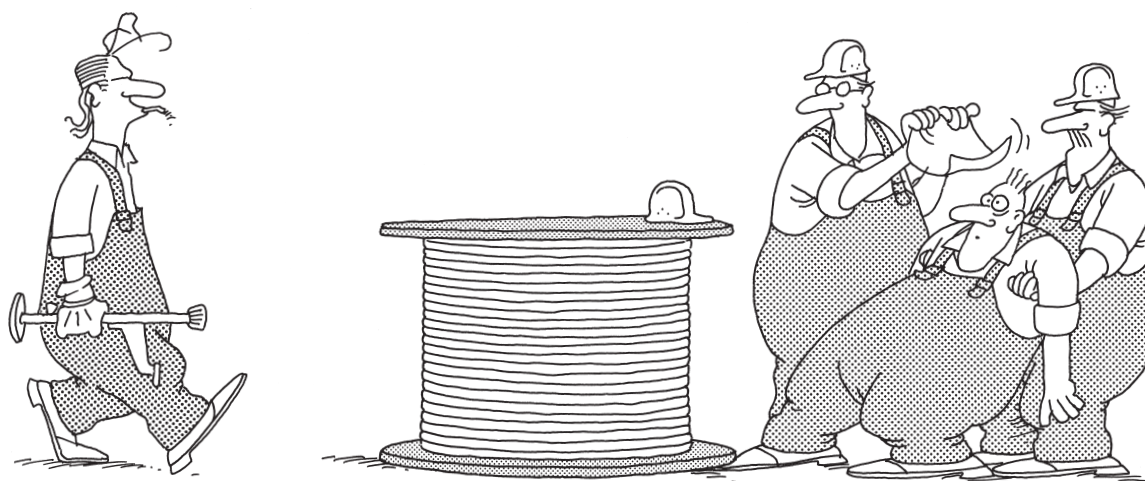
10. Problem: dobre liny są drogie

Liny stalowe o wysokiej jakości są droższe aniżeli konstrukcje konwencjonalne.

10.1. Rozwiązanie: obliczenie kosztów całkowitych

Złe liny są tańsze od dobrych. Ale po pewnym czasie kupisz trzy złe liny, podczas gdy jedna dobra mogłaby wystarczyć. Ponadto, transport złej liny do dźwignicy kosztuje tyle samo, co transport dobrej liny. A montaż złej liny kosztuje tyle samo, co montaż dobrej, ale możesz musieć to zrobić trzy razy ze złą liną i tylko raz z dobrą. Zatem kupując droższą linę, zaoszczędzisz dużo pieniędzy.

Zawsze dostajesz to, za co płacisz. W przypadku lin dźwignicowych jest to bardziej prawdziwe niż w przypadku innych elementów maszyn.



We wszelkich problematycznych sprawach związanych z linami, istnieje jednoznaczne rozwiązanie: prosimy o telefoniczny kontakt z nami!

Autor:

Dyp. Inż. Roland Verreet
Wire Rope Technology Aachen
Grünenthaler Str. 40a • 52 072 Aachen • Germany
Phone: +49 241- 173147 • Fax +49 241- 12982
Mail: R.Verreet@t-online.de

Wire Rope Technology Aachen

Dipl.-Ing. Roland Verreet

Grünenthaler Str. 40a • 52072 Aachen • Germany

Phone: +49 241- 173147 • Fax: +49 241- 12982

Mail: R.Verreet@t-online.de

www.ropetechnology.com