

3. SKRĘCONA LINA

1. TREŚĆ PROBLEMU

Przytrzymując linę skręcaj jeden z jej końców. W pewnym miejscu lina uformuje się w spiralę lub pętlę. Zbadaj i wyjaśnij to zjawisko.

2. OBSERWACJE ZJAWISKA

Poniżej prezentujemy wygląd pętli i spirali powstających na naszej linie.



Ryc. 1. Pętle i spirale

3. ANALIZA TEORETYCZNA SKRĘCANIA LINY

Rozpatrzmy linę, na której nie powstały jeszcze ani pętle, ani spirale.

Zauważmy, że oś obrotu liny jest prostą łączącą środki dwóch końców liny. Na linę mogą działać siły tarcia ze strony każdego palca dotykającego liny.

Po zwiększeniu sił skręcanie liny kończy się prawie natychmiast i lina spoczywa. Wtedy wszystkie siły i momenty sił działające na linę równoważą się.

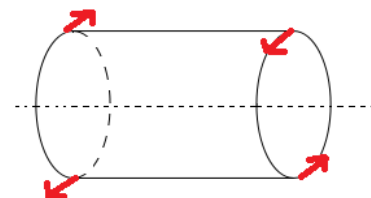
Momenty sił zewnętrznych skręcają każdy fragment liny, więc gdy lina spoczywa są one równoważone przez momenty sił wewnętrznych. Siłami wewnętrznymi mogą być:

- oddziaływania włókien równoległych – skręcanie liny powoduje ich ściskanie.
- oddziaływania dwóch fragmentów liny – w przypadku pętli lub spirali stykają się ze sobą na początku oddalone części liny

W pracy za pętlę będziemy uważać taką skrętkę liny, że stykają się w niej fragmenty liny. Dlatego niestykających się zwojów spirali nie będziemy dalej nazywać pętlami.

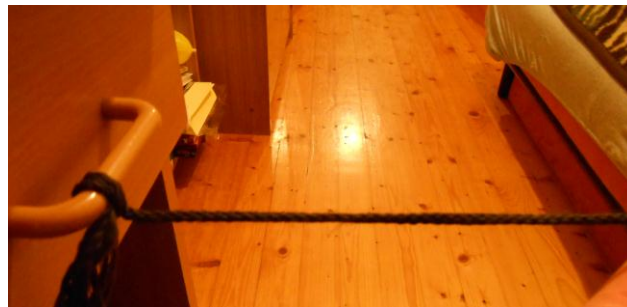
4. ZACHOWANIE LINY

Żeby zrozumieć przyczynę powstawania pętli i spirali, zobaczymy jak zachowuje się przykładowa lina. W doświadczeniu wykorzystaliśmy sznurek do zacieśniania kaptura z polarowej bluzy. Badaliśmy dwie sytuacje:



Ryc. 2. Schematyczne przedstawienie rozkładu sił działających na linę^[1]

- a) gdy na początku linka jest napięta i w czasie eksperymentu staramy się stale utrzymywać takie samo napięcie



Ryc. 3. Linka lekko napięta

- b) gdy linka jest rozluźniona i na początku tworzy kształt przypominający literę U:



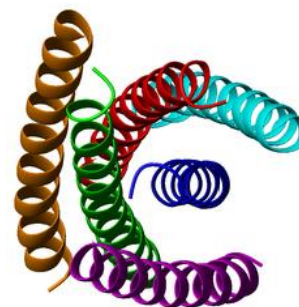
Ryc. 4. Linka rozluźniona

4.1. LINA LEKKO NAPIĘTA

Skręcanie liny na początku powoduje prawie jednorodne obracanie się liny. Zjawisko powstawania pętli nie występuje od razu, tylko dopiero po znacznym skręceniu liny. W czasie tego skręcania warto zwrócić uwagę na jeszcze inne zjawisko.

Podczas jednego obrotu włókna zewnętrzne rozciągają się znacznie bardziej, niż wewnętrzne^[2]. Wynika to z tego, że podczas obrotu punkty na powłoce liny pokonują większą drogę, niż punkty w pobliżu jej środka.

Wydłużaniu włókien zewnętrznych towarzyszy zwężanie spirali, jaką tworzą – gdy dochodzą do granic rozciągliwości dalsze skręcanie jest możliwe tylko wtedy, gdy spirala zmniejszy swoją objętość. Dobrym zobrazowaniem tego zjawiska jest na przykład zwojnica – dla stałej długości drutu, ilość zwojów (pełnych obrotów drutu) zależy od promienia zwojnicy. Dlatego skręcanie liny, które zwiększa ilość „zwojów” na powłoce powoduje jej zwężanie.



Ryc. 5. różne spirale^[3]

Zwężanie liny powoduje z kolei ściskanie włókien wewnętrznych. One również, ze względu na swoją budowę, mogą się kurczyć tylko do pewnego momentu. Gdyby lina, którą skręcamy była idealnie jednorodna, skręcanie mogłoby zakończyć wraz z maksymalnym ściśnięciem włókien wewnętrznych.

W rzeczywistości tak nie jest, gdyż taka lina nie istnieje. Lina nie jest jednorodna na całej swojej długości i dlatego sądzimy, że jej fragmenty nierównomiernie się ścisną i w różnych momentach osiągają swoje maksymalne ściśnięcie.



Ryc. 6. Fragment linki, który wygląda na sztywniejszy niż sąsiednie

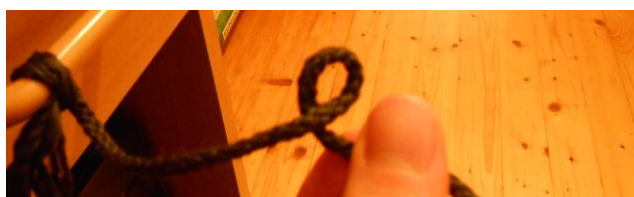
Teoria wyjaśniająca powstawanie pętli może opierać się na zjawisku powstawania różnic w ściśnięciu fragmentów liny. Mocniej ściśnięte fragmenty liny tracą możliwość dalszego skręcania i stają się pod tym względem sztywne i pozostałe fragmenty liny zaczynają obracać się względem niego. Pętle i spirale nie powstają na nich, tylko pomiędzy nimi. Jest to jednak bardzo ogólne stwierdzenie, gdyż sztywniejsze fragmenty skręcają się pod wpływem dalszego skręcania liny.

Pętle, które powstały przy rozciągnięciu liny są małe i ściśnięte.

4.2. ROZLUŻNIONA LINA

Przy skręcaniu rozluźnionej liny pętle lub spirale powstają prawie natychmiast. Włókna wewnętrzne nie kurczą się tak mocno, jak w poprzednim przypadku. Dla pierwszej pętli lub spirali skurczenie ich praktycznie w ogóle nie zachodzi.

Podczas skręcania rozluźnionej liny powstają pętle o znacznie większym promieniu, niż w przypadku rozciągniętej liny. Zauważyliśmy, że dzięki pętlom pojedyncze fragmenty liny mogą być wyprostowane (nieskręcone), mimo iż lina jako całość jest skręcona.



Ryc. 7. Pętla na rozluźnionej lince

W obu przypadkach zauważamy podobieństwo: różne fragmenty liny mają różną podatność na skręcanie i zginanie, niektóre są sztywniejsze od innych. Różne są jednak powody tej sztywności. Tym razem wynika ona z nierównomiernego rozciągnięcia różnych fragmentów liny.

Nierównomierne rozciągnięcie powoduje siła grawitacji. Lina, układając się w dolinę, jest rozciągnięta np. na przegięciach, gdzie włókna idące na zewnątrz pokonują dłuższą drogę, oraz na stokach, gdzie lina jest ciągnięta przez linę na dnie doliny.

Poza tym lina jest sztywna w pobliżu końców. Jest to spowodowane po prostu ściśnięciem końca liny przez palce. Poprzednio zauważyliśmy, że pętle powstają pomiędzy sztywniejszymi fragmentami. Możemy się spodziewać, że zaobserwujemy pętle pomiędzy końcem liny, a najbliższym punktem przegięcia. Taka sytuacja jest ma miejsce na rycinie [7](#).

Czasami zamiast pętli formują się spirale. Można pomóc im powstawać zbliżając do siebie końce liny podczas skręcania.

4.3. NAJWAŻNIEJSZE WNIOSKI

- a) Na proces powstawania pętli i spiral ma wpływ rozciągnięcie liny – im bardziej jest rozciągnięta, tym bardziej trzeba ją skręcić, by zaszło opisywane w zadaniu zjawisko.
- b) Liny nie są jednorodne.
- c) Liny mogą rozciągać się i ścisnąć nierównomiernie na swej długości.
- d) Pod wpływem silniejszego ściśnięcia lub rozciągnięcia niektóre fragmenty liny mogą być sztywniejsze (mniej podatne na skręcanie i zginanie) niż inne.
- e) Dzięki pętlom pojedyncze fragmenty liny mogą być wyprostowane (nieskręcone), mimo iż lina jako całość jest skręcona.

5. NIEJEDNORODNOŚCI W ROZCIĄGIĘCIU I ŚCIŚNIĘCIU LINY

Niejednorodności w rozciągnięciu liny tłumaczy występowanie sił zewnętrznych zmieniających kształt liny – w naszym przypadku jest to siła grawitacji. Pod wpływem jej działania, zwisająca lina przybiera kształt doliny U-kształtnej, z zaokrąglonymi brzegami. Fragmenty na większej wysokości utrzymują te poniżej ich w spoczynku za pomocą składowych sił sprężystości.

Niejednorodności w ściśnięciu liny mogą wynikać ze ściskania jej palcami oraz z różnic w szerokości i sprężystości liny. Wpływ ściskania liny palcami jest oczywisty.

Inaczej jest z różnicą w szerokości liny, która powoduje, że siły skręcające dany fragment liny są położone odpowiednio dalej lub bliżej osi obrotu liny, co wpływa na wielkość momentów tych sił i tym samym na skręcenie danego fragmentu.

Również różnice w sprężystości liny mają znaczenie. Im większy współczynnik sprężystości fragmentu, tym słabsze skręcenie liny jest potrzebne do zrównoważenia zewnętrznych momentów sił skręcających działających na ten fragment. Ze względu na słabsze skręcenie, słabsze jest skurczenie się włókien wewnętrznych.

6. MOMENT POWSTANIA PIERWSZEJ PĘTLI

Postanowiliśmy sprawdzić, ile potrzeba obrotów liny, aby powstała pierwsza pętla. Wpływ na to ma na pewno wiele czynników:

- a) długość liny
- b) naprężenie
- c) kształt przekroju poprzecznego i jego rozmiar
- d) budowa wewnętrzna liny
- e) ustawienie liny w przestrzeni

6.1. WPŁYW ŚREDNICY LINY

Żeby określić wpływ średnicy liny na powstawanie pierwszej pętli, będziemy obracać różne liny i spisywać ilość obrotów, po których powstała pierwsza pętla.

Do dyspozycji mieliśmy cztery liny, o średnicach odpowiednio 8, 4, 3, 2 mm. Każdą z nich badaliśmy na odcinku o tej samej długości: 20 cm.



Ryc. 8. Liny, wykorzystane w doświadczeniu

Każdą z lin powiesiliśmy na drążku i obciążyliśmy reklamówką z nalaną do niej wodą. Ilość wody dobieraliśmy tak, by każda lina miała identyczne naprężenie $\sigma_0 \approx 0,31 \frac{N}{mm^2}$, co odpowiada naprężeniu, jakie wywołuje siatka z 1600 ml wody powieszona na linie o średnicy przekroju poprzecznego 8 mm.

W doświadczeniu zaniedbaliśmy wpływ budowy wewnętrznej liny.

Każdą linę powiesiliśmy pionowo, minimalizując w ten sposób wpływ siły grawitacji na powstanie niejednorodności i u-kształtne ułożenie liny.

Poniżej prezentujemy wygląd stanowiska pomiarowego i wyniki naszych pomiarów. Na zdjęciu stanowiska pomiarowego zabrakło ołówka w dolniej pętli liny. Służył on jako dźwignia – ułatwiał skręcanie lin.

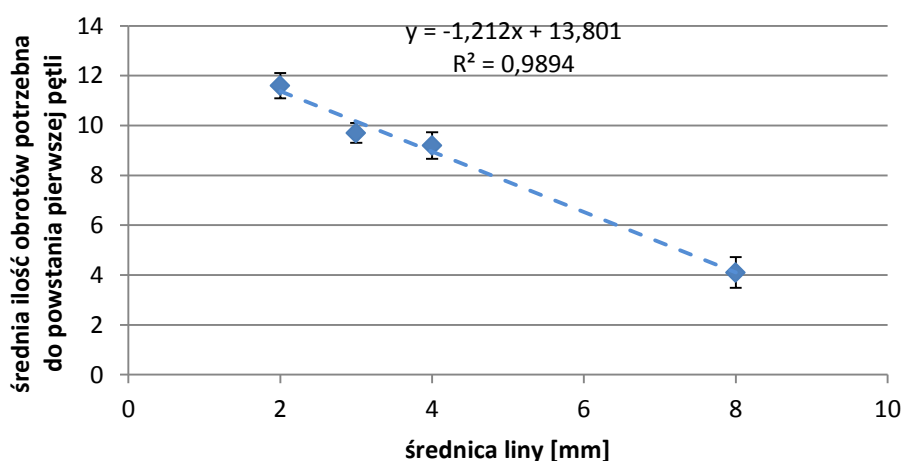
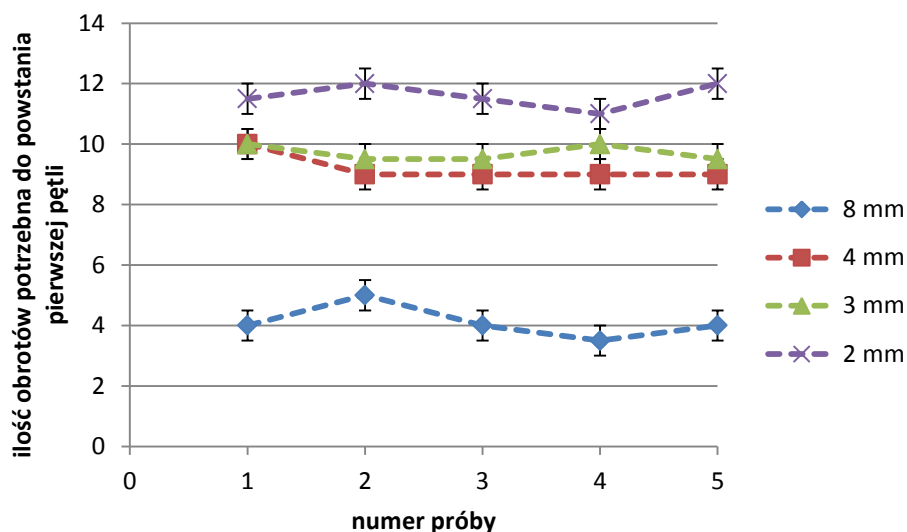


Ryc. 9. Stanowisko pomiarowe

Ze niepewność pomiaru ilości obrotów przyjęliśmy $\pm 0,5$ obrotu. Niepewność pomiaru średniej wyznaczyliśmy na poziomie ufności 70 % za pomocą metod opisanych w [8.4](#).

Na ostatnim wykresie widzimy, że w zbadanym zakresie zależność średniej ilości obrotów potrzebnej do powstania pierwszej pętli od średnicy liny jest liniowa.

Im większa jest średnica liny, tym pętle wcześniej powstają.

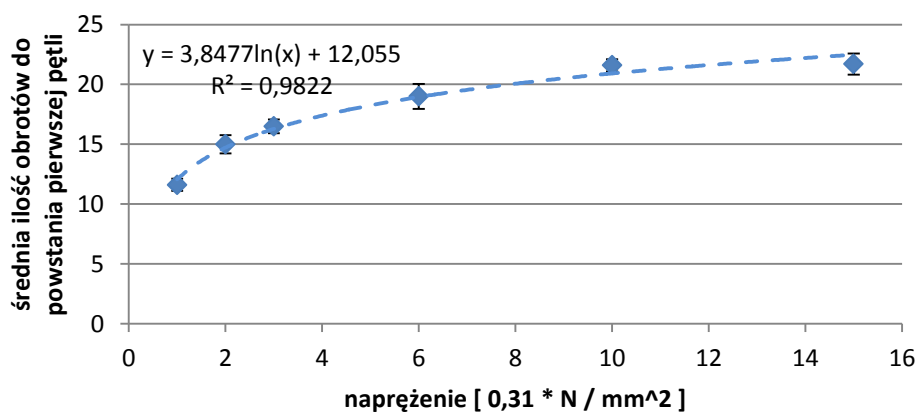


6.2. WPŁYW NAPRĘŻENIA LINY

Żeby określić wpływ naprężenia liny na moment powstania pierwszej pętli, zbadaliśmy linę o średnicy przekroju 2 mm w identyczny sposób jak w podrozdziale [6.1.](#), z tą różnicą, że zmienialiśmy obciążenie. Poniżej prezentujemy wynik doświadczenia.

Niepewność pomiaru średniej wyznaczyliśmy na poziomie ufności 70 % za pomocą metod opisanych w [8.4](#).

Na wykresie widzimy, że wraz ze wzrostem naprężenia liny zmniejsza się wpływ tego naprężenia na moment powstania pierwszej pętli.



Im większe naprężenie, tym później powstaje pierwsza pętla.

6.3 OBSERWACJA POWSTAWANIA PĘTLI

W doświadczeniu zauważyliśmy, że w opisanych warunkach i po powstaniu pierwszej pętli, niezależnie od wcześniejszej ilości obrotów liny, kolejne pętle powstają co 1 – 2 obroty liny. Sądzymy, że włókna wewnętrzne liny są wtedy praktycznie maksymalnie ściśnięte i dalsze skręcanie może się odbywać tylko poprzez tworzenie się pętli.

Zanim pierwsza pętla powstanie, lina już zaczyna tworzyć spiralę, często równomierną i rozciągającą się na całej długości odcinka liny.

Niekiedy, przy bardzo powolnym skręcaniu, zdarza się, że 2 pętle powstają prawie równocześnie.

7. PODSUMOWANIE

Sądzymy, że powodem powstawania pętli i spirali są niejednorodności w rozciągnięciu i ściśnięciu fragmentów liny. To powoduje, że niektóre fragmenty są sztywniejsze niż inne i zachowują się jak bryły sztywne, tzn. pod wpływem skręcania liny te fragmenty obracają się, podczas gdy inne, bardziej miękkie, dopasowują się do nich

Nie jesteśmy jednak w stanie dokładnie opisać tego zachowania i stworzyć teorii wyjaśniającej powstawanie pętli i spiral na lince. Największym problemem jest ustalenie granicy pomiędzy fragmentami sztywnymi i miękkimi. Ponieważ jest ona płynna, same pojęcia fragmentów sztywnych i miękkich tracą sens. Poza tym nie potrafimy uściślić, co rozumiemy przez sztywność czy podatność na skręcanie.

Mimo porażki w stworzeniu kompletnej teorii, jesteśmy zadowoleni z wyjaśnienia powstawania niejednorodności w rozciągnięciu i ściśnięciu liny.

8. ŹRÓDŁA

8.1. OBRAZ WALCA

Pochodzi z *Wikimedia Commons*, ale został dodatkowo zmodyfikowany.

[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cylinder\(geometry\).png?uselang=pl](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cylinder(geometry).png?uselang=pl)

8.2. BUCKLING OF FIBRES AND YARNS WITHIN ROPES AND OTHER FIBRE ASSEMBLIES

R. E. Hobbs, M. S. Overington, J. W. S. Hearle, and S. J. Banfield.

http://www.tensiontech.com/papers/papers/buckling_fibres_yarns/buckling_fibres_yarns.pdf

8.3. OBRAZ SPIRALI

Pochodzi z *Wikimedia Commons*, nie był modyfikowany.

http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Gp41_coiled_coil_hexamer_1aik_topview.png?uselang=pl

8.4. ANALIZA BŁĘDÓW I NIEPEWNOŚCI POMIAROWYCH

http://www.eti.pg.gda.pl/katedry/kmoe/dydaktyka/Metrologia/analiza_bledow.pdf