

Jan HANKUS  
Główny Instytut Górnictwa w Katowicach

### MODELE WZDŁUŻNYCH ODKSZTAŁCEŃ LINY STALOWEJ

Streszczenie. W referacie omówiono wyniki badań wzdluznych odkształceń liny stalowej przeprowadzonych w różnych warunkach obciążeń. Podjęto próbę opracowania modeli opisujących zmianę wzdluznych odkształceń liny rozciąganej aż do zerwania, poddanej stałemu obciążeniu w czasie oraz pracującej w złożonym stanie naprężeń cyklicznie zmiennych.

### MODELS OF LONGITUDINAL DISPLACEMENTS OF A STEEL ROPE

Summary. The results of investigations of longitudinal displacements of a steel rope, conducted in various loading conditions have been presented in the paper. The trial has been under taken to elaborate the models describing the changes of longitudinal deformations of the rope stretched until its break subjected to a time-constant load and operating in the composed state of periodically changing stress.

### МОДЕЛИ ПРОДОЛЖНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ СТАЛЬНОГО КАНАТА

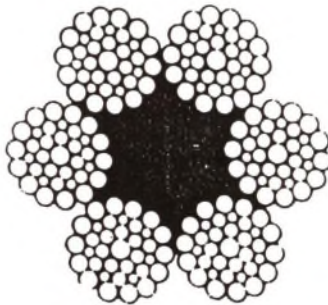
резюме. В докладе рассмотрено результаты испытаний продолжных деформаций стального каната, проведенных в разных условиях нагружений. Начались опыты разработки моделей, описывающих изменение продолжных деформаций каната растягиваемого до обрыва, подвергнутого постоянному нагружению во времени и работающему в сложном состоянии циклически изменяющихся напряжений.

## 1. WSTĘP

Złożona budowa oraz złożony stan naprężeń i tarcie występujące w obciążonej linie powodują, że określanie własności mechanicznych lin jest bardziej utrudnione niż w przypadku jednorodnych prętów i cięgien. Badania doświadczalne wykazały, że liny

stalowe mają zmienny moduł sprężystości, wykazują histerezę odkształceń przy statycznym obciążaniu i odciążaniu, a także zanikanie drgań swobodnych przy obciążeniach dynamicznych. Stwierdzono również doświadczalnie, że w linach stalowych występuje zjawisko pełzania i relaksacji w temperaturze otoczenia.

W pracy omówiono wyniki doświadczalnych badań wzdłużnych odkształceń liny stalowej o liniowym styku drutów typu Warrington-Seale, o średnicy 50 mm, której przekrój poprzeczny przedstawiono na rys.1. Liny tego typu mają szerokie zastosowanie w praktyce. Podjęto również próbę matematycznego opisu wzdłużnych odkształceń liny w różnych warunkach obciążeń. Badania przeprowadzone zostały w Głównym Instytucie Górnictwa w Katowicach.



**Rys.1. Przekrój poprzeczny liny stalowej Warrington-Seale 6x36+Ao**  
**Fig.1. Cros section of Warrington-Seale 6x36 + Ao rope tested**

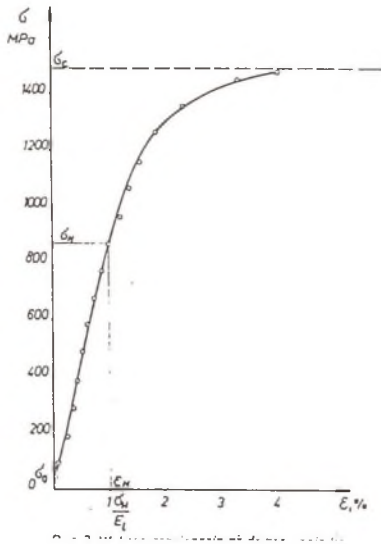
## 2. ROZCIĄGANIE LINY STALOWEJ AŻ DO ZERWANIA

Badania wzdłużnych odkształceń liny rozpoczęto od statycznej próby jednoosiowego rozciągania aż do zerwania. Na rys.2 przedstawiono wykres rozciągania liny w układzie naprężenie nominalne  $\sigma$  - odkształcenie  $\epsilon$ . Jest on podobny do wykresów rozciągania materiałów nie wykazujących wyraźnej granicy plastyczności  $R_e$ . Ze względu na znaczne wydłużenie lin fabrycznie nowych nie można również wyznaczyć umownej granicy proporcjonalności  $R_{0,005}$  i umownej granicy plastyczności  $R_{0,2}$  jak w przypadku drutów lub prętów.

Z wykresu rozciągania liny można jedynie wyznaczyć naprężenie  $\sigma_H$ , przy którym zachodzi jeszcze w przybliżeniu liniowa zależność pomiędzy naprężeniem a odkształceniem. Naprężenie  $\sigma_c$  odpowiada sile zrywającej linę w całości i jest naprężeniem maksymalnym, jakie osiąga się w statycznej próbie rozciągania liny aż do zerwania. Podobne prawidłowości stwierdzono dla lın stalowych innych konstrukcji.

W pracy [4] przedstawiono modele schematyzacji rzeczywistych wykresów rozciągania dla materiałów, których własności sprężyste i plastyczne różnią się od własności miękkiej stali.

Dla wykresu rozciągania analizowanej liny (rys.2) podjęto próbę dopasowania dwóch modeli.



Rys.2. Wykres rozciągania aż do zerwania liny Warrington-Seale fabrycznie nowej  $\phi$  50 mm  
 Fig.2. Tension curve up to rupture of a brand new Warrington-Seale rope with a diameter of 50 mm

2.1. Model materiału sprężysto-plastycznego z potęgowym wzmocnieniem  
 Związek pomiędzy naprężeniem a odkształceniem określa zależność:

$$\sigma = \begin{cases} E \epsilon & \left( \epsilon \leq \frac{\sigma_H}{E_1} \right) \\ k \epsilon^n & \left( \epsilon \geq \frac{\sigma_H}{E_1} \right) \end{cases} \quad (1)$$

gdzie:  $E_1$  jest to moduł sprężystości liny fabrycznie nowej przy pierwszym obciążeniu, wyznaczony w zakresie naprężeń  $\sigma_0 - \sigma_H$  (rys.2),

$\sigma_0$  - naprężenie wstępne niezbędne do wyprostowania próbki.

Przekształcając (1) otrzymujemy zależności na obliczanie wzdłużnych odkształceń liny:

$$\varepsilon = \begin{cases} \frac{\sigma}{E_1} & \text{dla } \sigma = \sigma_0 + \sigma_H \\ \left(\frac{\sigma}{k}\right)^m & \text{dla } \sigma \geq \sigma_H \left(m = \frac{1}{n}\right) \end{cases} \quad (2)$$

## 2.2. Model materiału o asymptotycznie idealnej plastyczności

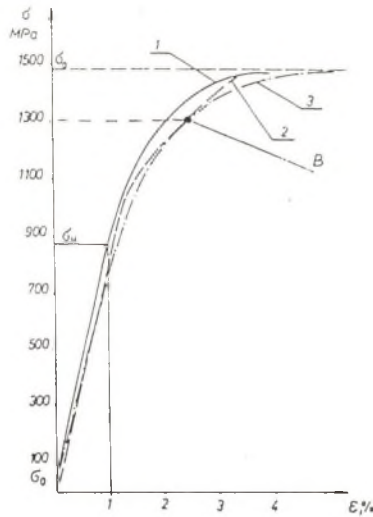
Przyjęto materiał o dwuparametrowej schematyzacji tangensem hiperbolicznym, dla którego związek pomiędzy naprężeniem a odkształceniem opisuje zależność:

$$\sigma = \sigma_c \operatorname{tanh} \left( \frac{\varepsilon E_1}{\sigma_c} \right). \quad (3)$$

Uwzględniając wyniki badań doświadczalnych liny, a mianowicie  $E_1 = 826 \cdot 10^2$  MPa,  $k = 930$  MPa,  $n = 0.378$ ,  $m = 2.645$ ,  $\sigma_H = 871$  MPa,  $\sigma_c = 1476$  MPa, sporządzono wykresy rozciągania i porównano je z wykresem rzeczywistym (rys.3). W zakresie naprężeń  $\sigma_0 - \sigma_H$  występują małe różnice w przebiegu wykresów rozciągania. Następnie różnice się zwiększają i począwszy od punktu B (rys.3) jakościowo lepsze przybliżenie daje model tangensa hiperbolicznego (krzywa nr 3). Oznacza to, że w końcowej fazie rozciągania lina przyjmuje cechy materiału o idealnej plastyczności. Zagadnienia te wymagają dalszych badań z linami różnych konstrukcji.

Przekształcając (3) otrzymujemy model określający zmianę odkształceń liny w funkcji naprężenia

$$\varepsilon = \frac{\sigma_c}{E_1} \operatorname{artanh} \left( \frac{\sigma}{\sigma_c} \right). \quad (4)$$



Rys.3. Wykresy rozciągania aż do zerwania liny Warrington-Seale fabrycznie nowej

- 1 - krzywa doświadczalna
- 2,3 - schematyzowane krzywe analityczne

Fig.3. Tension curve up to rupture of a brand new Warrington-Seale rope of 50 mm diameter.

- 1 - experimental curve
- 2,3 - schematiset analytical curves

### 3. WZDŁUŻNE ODKSZTAŁCENIA PRZY STAŁYM OBCIĄŻENIU LINY

Próby pełzania trwające 90 minut przeprowadzono w pomieszczeniu zamkniętym o temp.  $+22^{\circ} \pm 2^{\circ} \text{ C}$ . Szczegółowa metodyka badań opisana została w poprzednich pracach autora [1,2].

Przedstawiając zmianę naprężenia i odkształcenia badanej liny w funkcji czasu otrzymuje się wykres przedstawiony na rys.4. Ponieważ założone obciążenie  $P_1$  nie zostało przyłożone natychmiast w chwili  $t=0$ , lecz po upływie czasu  $t_1$ , wydłużenie  $\epsilon(t)$  w dowolnym punkcie krzywej BC wynosi:

$$\epsilon(t) = \epsilon(t_1) + \epsilon_p(t-t_1) , \tag{5}$$

przy czym  $\epsilon(t_1)$  jest odkształceniem wywołanym przez zmianę naprężenia od  $\sigma_0$  do  $\sigma_1$  bezpośrednio po osiągnięciu pełnego obciążenia  $P_1$ . Wyrzucić możemy go zależnością:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_1 - \sigma_0}{E_{1_1}} \quad (6)$$

gdzie  $E_{1_1}$  jest chwilową wartością modułu sprężystości liny fabrycznie nowej przy pierwszym obciążeniu.

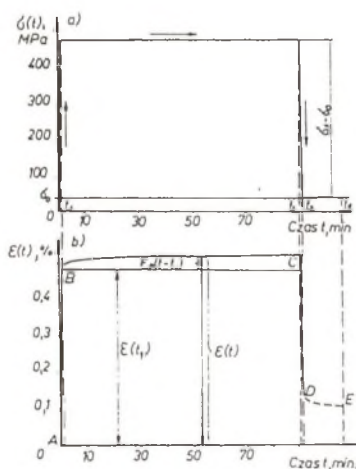
Z dotychczasowych badań wynika [1,2], że pierwszy i drugi okres pełzania lin stalowych oraz wielu innych materiałów [3] opisać można funkcją wykładniczą czasu.

W związku z tym funkcję pełzania określa zależność:

$$\varepsilon(t) = (\sigma_1 - \sigma_0) \left[ \frac{1}{E_{1_1}} + a(t - t_1)^m \right] \quad (7)$$

Wykorzystując wyniki pomiarów pełzania badanej liny Warrington-Seale otrzymano funkcję pełzania:

$$\varepsilon(t) = 0.852 + 0.0204(t - t_1)^{0.294} \quad (8)$$



Rys.4. Wykres obciążenia i deformacji w funkcji czasu podczas próby pełzania liny Warrington-Seale  $\phi 50$  mm

Fig.4. Stress (a) and deformation (b) diagram against time function during creep test of Warrington-Seale rope of 50 mm diameter

Dla badanej liny i przy zastosowaniu wartości stałego naprężenia  $\sigma = 470$  MPa największa prędkość pełzania występuje w okresie pierwszych 15 minut utrzymywania stałego obciążenia. Natomiast pierwszy (nieustalony) okres pełzania kończy się po ok. 60 minutach działania stałego obciążenia. Po tym okresie i w temperaturze otoczenia

zaistniałe zmiany makrostruktury geometrycznej liny wywołują wzrost oporu do plastycznego odkształcania i zmniejszenie prędkości pełzania.

#### 4. WZDŁUŻNE ODKSZTAŁCENIA LINY W ZŁOŻONYM STANIE NAPRĘŻEŃ CYKLICZNIE ZMIENNYCH

Wieloletnie badania zmęczeniowe prowadzone w GIG wykazały, że liny wyciągowe poddane złożonym obciążeniom cyklicznie zmiennym wydłużają się według charakterystycznych krzywych. Podobne są one do klasycznej krzywej pełzania uzyskanej w prostej próbie rozciągania próbki. Proces wydłużania się liny podzielić można na trzy okresy (rys.5). W pierwszym początkowym okresie (I) prędkość wydłużania jest zmienna i stopniowo maleje, osiągając pewną wartość minimalną. W drugim okresie (II) prędkość wydłużenia jest praktycznie stała i ma wartość minimalną. W trzecim okresie (III) prędkość wydłużania znowu rośnie, aż do zerwania próbki.

We wcześniejszej pracy autora [1] wykazano, że proces narastającego wydłużenia się liny w funkcji liczby cykli  $N$ ,  $\epsilon = F(N)$  opisać można wielomianem trzeciego stopnia, a mianowicie:

$$\epsilon = a_0 + a_1N + a_2N^2 + a_3N^3, \quad (9)$$

gdzie:  $\epsilon$  - wydłużenie względne liny, %

$N$  - liczba cykli w tysiącach.

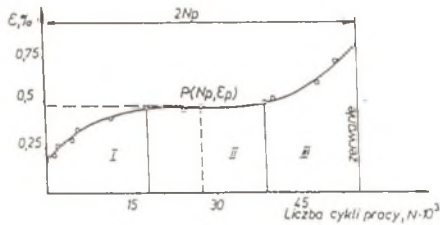
Krzywa ta ma jeden punkt przegięcia  $P$  o współrzędnych  $N_p$  i  $\epsilon_p$ .

Dla liny Warrington-Seale  $\phi$  50 mm, badanej w maszynie zmęczeniowej P4-GIG-2 [1] aż do zerwania otrzymano zależność:

$$\epsilon = 0.184 + 3.263 \cdot 10^{-2}N - 1.2487 \cdot 10^{-3}N^2 + 1.5737 \cdot 10^{-5}N^3. \quad (10)$$

Na rys.5 przedstawiono punkty odwzorujące wyniki badań, przebieg krzywej wydłużania według (10) oraz punkt przegięcia  $P$ . Punkt przegięcia usytuowany jest symetrycznie w środku krzywej, stąd też asymptota pionowa w punkcie zerwania  $N_z$  dąży do granicy

$\lim_{N \rightarrow \infty} F(N) \rightarrow \infty$ , gdy  $N \rightarrow 2N_p$ . Ma to istotne znaczenie praktyczne. Pozwala bowiem przewidywać końcową liczbę cykli aż do zerwania bez konieczności prowadzenia badania zmęczeniowego aż do końca. Praktyka wykazała, że podobny przebieg wydłużania ma lina wyciągowa pracująca w urządzeniu wyciągowym w kopalni. Dlatego też górnicze przepisy bezpieczeństwa nakazują prowadzenie dla każdej liny wykresów wydłużania się. Ich przebieg odwzorowuje sumaryczne osłabienie liny, co jest istotne przy podejmowaniu decyzji o konieczności odłożenia liny.



Rys.5. Punkty odwzorujące wyniki badania oraz przebieg krzywej teoretycznej wydłużania się liny Warrington-Seale  $\phi 50$  mm badanej w maszynie zmęczeniowej  
 Fig.5. Points reflecting the test data and the theoretical elongation curve for 50 mm Warrington-Seale rope. I,II,III - elongation periods

## LITERATURA

- [1] Hankus J.: Budowa i własności mechaniczne lin stalowych. Wyd.1. Katowice GIG 1990.
- [2] Hankus J.: Rheologic Properties of Mine Hoist Ropes. "International Deep Mining Conference", Johannesburg, SAIMM, 1990, s. 811-817.
- [3] Rabotnow J. N., Milejko S.T.: Kratkowriemiennaja połączest. Nauka, Moskwa 1970.
- [4] Skrzypek J.: Plastyczność i pełzanie. Wyd.1. PWN, Warszawa 1986.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Eugeniusz Świtoński  
 Wpłynęło do Redakcji w grudniu 1993 r.

## Abstract

Due to the complex design of ropes and the composite condition of stress and friction in ropes under load, it is more difficult to determine the mechanical properties of wire rope than those of a standard steel rod. This is also true for the longitudinal displacements (elongation).

The elongation curves of ropes up to rapture  $\sigma = F(\epsilon)$  resemble the tension curves of metal rods, i.e. there is no distinct plasticity limit (Fig.2). With a good approximation, the longitudinal deformations of a new rope stretched until its breakage, can be determined using the relations (2) and (4).



The phenomenon of creep occurs in wire ropes under constant load and at ambient temperature. The first stage of decaying creep (primary creep) can be described by the power equation at<sup>m</sup> (7) and (8). The maximum creep velocity appears during the period of a dozen or so initial minutes after applying a constant load.

Years of fatigue tests carried out in the Central Mining Institute proved that hoisting ropes subjected to complex loads altering in cycles elongate according to some characteristic curves. They are similar to the typical creeping curve. The increasing rope elongation in cycles number function,  $\epsilon = F(N)$ , may be described by the following third polynomial.