

JAN HANKUS

O REOLOGICZNYCH WŁASNOŚCIACH
GÓRNICZYCH LIN WYCIĄGOWYCH

Omówiono wyniki wstępnych badań własności reologicznych lin wyciągowych oraz przedstawiono krzywe krótkotrwałego pełzania wybranych lin trójkątnospłotkowych.

1. Wstęp

Liny wyciągowe są elementami nośnymi o złożonej budowie i określonej makrostrukturze. Składowymi liny są bowiem splotki, utworzone z kilku warstw drutów oraz rdzenie organiczne najczęściej sizalowe. W skład liny wchodzi także smary służące do ochrony drutów przed korozją oraz do impregnacji rdzeni. W linie fabrycznie nowej struktura wewnętrzna nie jest w pełni ustalona. Jak wykazują badania laboratoryjne i praktyka ruchowa, pod wpływem obciążeń stałych lub cyklicznie zmiennych następuje stopniowe zmniejszanie się średnicy przy równoczesnym wzroście długości liny. Zmienia się więc w sensie makro struktura geometryczna liny. Następuje bowiem zaciskanie i układanie się drutów w splotkach oraz osadzenie splotek na rdzeniu liny.

Własności mechaniczne lin wyciągowych takie jak wydłużenie, moduł sprężystości, poprzeczne odkształcenia itp. zmieniają się wraz ze zmianami struktury wewnętrznej liny. Wielkości tych zmian, jak wykazały badania autora [1], zależą od wielu czynników wynikających z konstrukcji i jakości wykonania liny, warunków obciążeń i czasu działania obciążeń. Wynika z powyższego, że liny wyciągowe wykazują własności reologiczne. W dotychczasowych badaniach w tym zakresie [4], [7] nie został określony jednoznacznie model reologiczny liny, który obrazowałby rzeczywiste jej własności.

W pracy niniejszej przedstawiono wyniki wstępnych badań własności reologicznych wybranych górniczych lin wyciągowych uzyskanych w Głównym Instytucie Górnictwa. Dane konstrukcyjne i wytrzymałościowe badanych lin zestawiono w tabelicy 1.

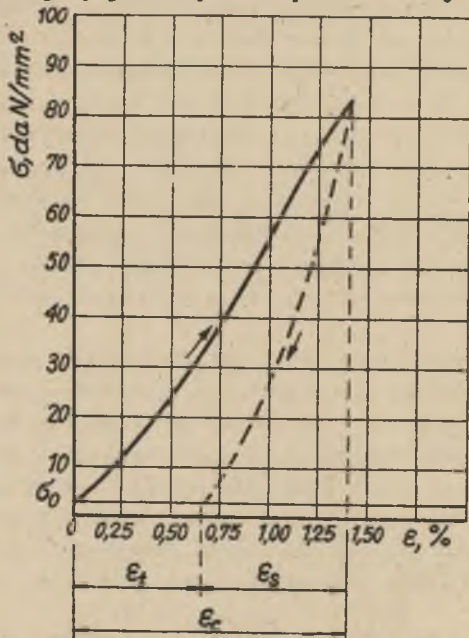
Tabelica 1

Dane konstrukcyjne i wytrzymałościowe badanych lin trójkątno-splotkowych

Lp.	Konstrukcja liny	Brednica liny d mm	Przekrój nośny mm ²	Wytrzymałość drutów R_m daN/mm ²	Nominalna siła zrywająca liny kN
1	6/6x2,41+12x2,68+18x2,70/+A ₀	52	1188	170	2019
2	6/6x1,65+12x1,83+13x2,76+19x2,78/+A ₀	56	1424	160	2278
3	6/6x2,23+12x2,48+15x3,10+21x3,14/+A ₀	70	2142	170	2641

2. Statyczne próby rozciągania lin fabrycznie nowych

Statyczne próby obciążania i odciążania lin wyciągowych różnych konstrukcji [1] wykazały, że dla lin fabrycznie nowych zależność pomiędzy naprężeniem a względnym wydłużeniem $\sigma = f(\epsilon)$ jest nieliniowa. Przebieg krzywej przy obciążaniu i odciążaniu wykazuje histerezę / rys. 1/, a lina nowa przy pierwszym obciążeniu doznaje znacznego wydłużenia trwałego.



Rys. 1. Wykres rozciągania liny okrągło-splotkowej fabrycznie nowej ϕ 55 mm typu w-k/16

Wydłużenie całkowite składa się z wydłużenia sprężystego i trwałego / rys. 1/

$$\epsilon_0 = \epsilon_s + \epsilon_t \quad /1/$$

gdzie:

ϵ_s - względne wydłużenie sprężyste,

ϵ_t - względne wydłużenie trwałe.

Uzyskane w normalnej próbie rozciągania wydłużenie ϵ_0

jest wydłużeniem chwilowym i zależnym tylko od wartości przyłożonego naprężenia σ , co można zapisać w formie $\epsilon_0 = f(\sigma)$.

Stwierdzone zjawisko histerezy przy obciążaniu i odciążaniu oraz znaczne wydłużenie trwałe liny pozwalają wnioskować, że wzdlużne odkształcenia lin fabrycznie nowych zależą również od czasu działania obciążenia. Potwierdziła to próba rozciągania prowadzona tzw. metodą schodkową / rys. 2/, podczas której na każdym stopniu obciążenie utrzymywano przez $\Delta t = 75$ s. Wydłużenie odczytywano bezpośrednio po osiągnięciu danego obciążenia oraz powtórnie po upływie czasu Δt . Badanie prowadzono na linie trójkątnospłotkowej $\phi 52$ mm / lina nr 1 w tabl. 1/, przy czym długość pomiarowa wynosiła $L_0 = 1200$ mm. Wydłużenie mierzono czujnikiem zegarowym o działce elementarnej 0,01 mm, a czas stoperem o działce elementarnej 0,1 s. Wydłużenie całkowite składało się na każdym stopniu obciążenia z wydłużenia sprężystego ϵ_s , trwałego ϵ_t oraz wydłużenia reologicznego ϵ_p

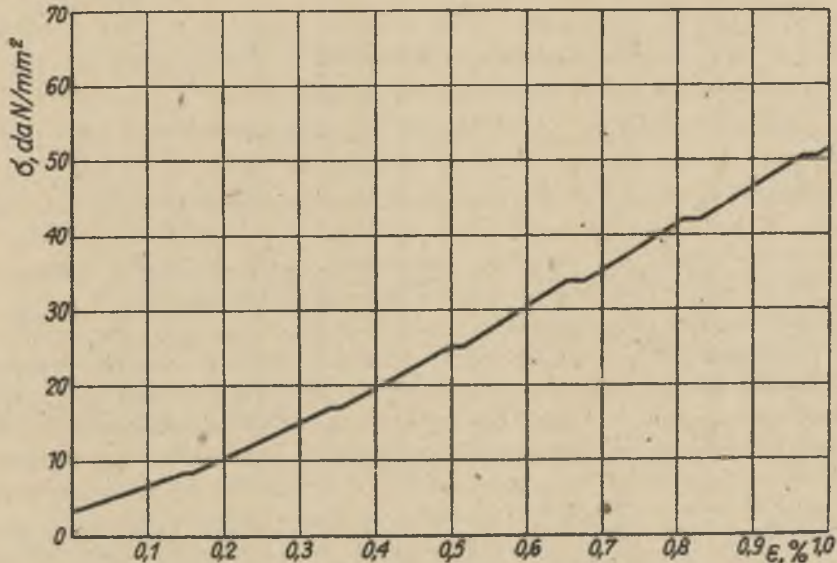
$$\epsilon_c = \epsilon_s + \epsilon_t + \epsilon_p \quad /2/$$

W wyniku badania stwierdzono, że przyrosty wydłużenia ϵ_p rosły ze wzrostem siły w linie. Wynosiły one od 0,14 do 0,28 mm. Mimo iż czas utrzymywania danego obciążenia wynosił zaledwie 75 s, wystąpiły wyraźne / możliwe do zmierzenia / przyrosty długości pomiarowej L_0 . W wyniku tego badania uznano za celowe przeprowadzenie próby pełzania liny w temp. otoczenia.

3. Krótkotrwałe próby pełzania lin fabrycznie nowych

3.1. Sposób przeprowadzenia prób

Próby pełzania dzieli się na próby długotrwałe, średniotrwałe i krótkotrwałe [5].



Rys. 2. Wykres rozciągania z pełzaniem liny trójkątnospłotkowej fabrycznie nowej $\phi 52$ mm. Długość pomiarowa liny $l_0 = 1200$ mm. Czas działania stałego obciążenia $t_p = 75$ s

Próby długotrwałe obejmują miesiące i lata, średniotrwale godziny i dni a krótkotrwałe sekundy i minuty.

W niniejszych badaniach próby pełzania przeprowadzono dla okresów 30 i 60 minut. Przedmiotem badań były liny trójkątospłotkowe fabrycznie nowe \varnothing 56 i 70 mm, których dane konstrukcyjne i wytrzymałościowe podaje tablica 1.

Próby przeprowadzono na poziomej maszynie wytrzymałościowej o maksymalnej sile 5000 kN, w pomieszczeniu zamkniętym o temperaturze $+ 22 \pm 2^\circ\text{C}$. Odcinki lin o długości $L = 4$ m z końcami zalanyymi w tulejach stożkowych mocowano w uchwytach maszyny wytrzymałościowej i obciążano od siły wstępnej $P_0 \approx \frac{1}{50} \cdot P_c$ /gdzie P_c - rzeczywista siła zrywająca linę w całości/. Następnie próbki lin obciążono do założonej siły $P_1 = 400$ i 550 kN, utrzymując w przybliżeniu stałą prędkość obciążania $\frac{dP}{dt} = 2 \text{ kN} \cdot \text{s}^{-1}$. Obciążenie P_1 utrzymywano przez okres czasu $t_p = 30$ min, przy linie \varnothing 56 mm oraz $t_p = 60$ min, przy linie \varnothing 70 mm. Zmiany długości pomiarowej L_0 mierzono przy pomocy czujnika zegarowego o działce elementarnej 0,01 po upływie 1, 2, 3, 4 i 5 min, a następnie co 5 minut. Wydłużenie względne obliczono ze wzoru

$$\epsilon_1 = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \cdot 100 \% \quad /3/$$

Proces obciążenia lin do siły P_0 realizowano, podobnie jak przy obciążaniu $\frac{dP}{dt} \approx 2 \text{ kN} \cdot \text{s}^{-1}$.

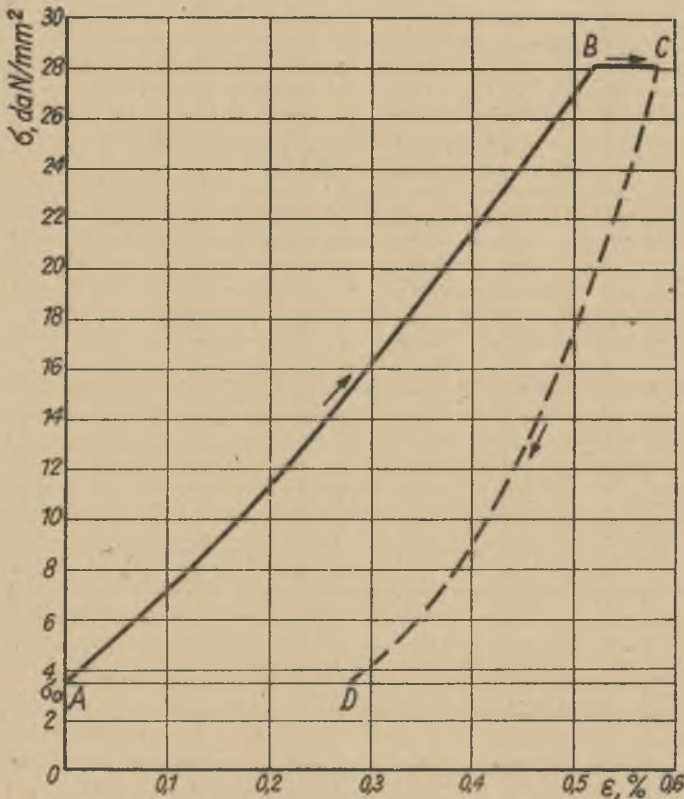
3.2. Wyniki badań

Na rys. 3 i 4 przedstawiono w układzie $\sigma - \epsilon$ przebieg procesu rozciągania badanych lin składających się z trzech faz:

1. obciążania - krzywa AB, gdzie naprężenie rosło od σ_0 do σ_1 .
2. pełzania - prosta BC, przy stałym naprężeniu σ_1 ,
3. odciążania - krzywa CD przy zmniejszającym się naprężeniu od σ_1 do σ_0 .

Krzywe na rys. 3 i 4 obrazują rzeczywiste własności liny, którą można uważać za materiał o określonych własnościach reologicznych.

Krzywe te różnią się wyraźnie od odpowiednich krzywych charakteryzujących wyidealizowane modele prostych ciał a mianowicie: ciała sprężystego, ciała lepkiego i ciała plastycznego [2], [6]. Należy dodać, iż w czasie trwania prób w linach panował złożony stan odkształceń składający się w ogólności z odkształceń sprężystych i trwałych, powstałych bezpośrednio po przyłożeniu obciążenia oraz z odkształceń trwałych narastających w czasie $t / \sigma_1 = \text{const}$ / wywołanych pełzaniem, czyli lepkiem płynięciem [2]. Wynika z tego, że liny można traktować jako złożone ciała reologiczne [2], [6] i przy opisie ich własności należy uwzględnić szereg parametrów reologicznych, które mają istotne znaczenie w okresie użytkowania lin w górniczych urządzeniach wyciągowych.



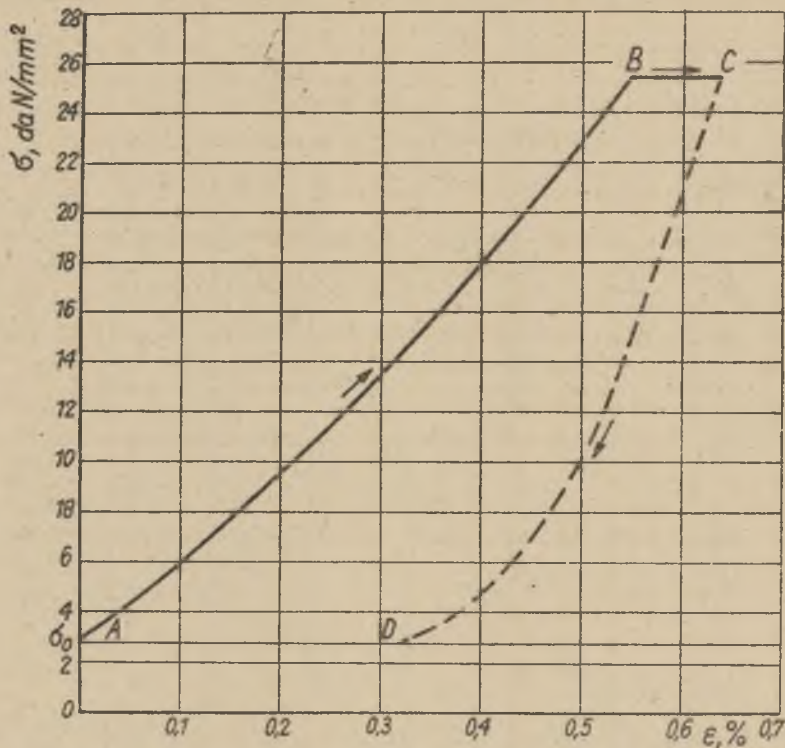
Rys. 3. Wykres rozciągania z pełzaniem liny trójkątnospłotkowej $\varnothing 56$ mm fabrycznie nowej.
 Długość pomiarowa liny $l_0 = 1200$ mm. Czas działania stałego obciążenia $t_p = 30$ min.

Przedstawiając zmianę wydłużenia badanych lin w funkcji czasu t , otrzymuje się dla faz 1 i 2 wykres przedstawiony schematycznie na rys.5

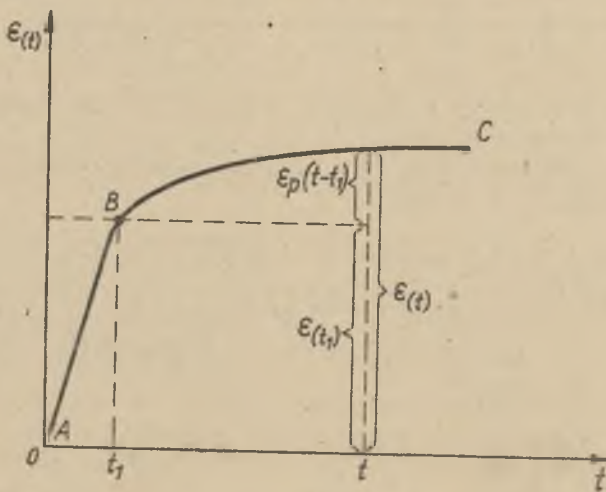
Ponieważ założone obciążenie P_1 nie zostało przyłożone natychmiastowo w chwili $t = 0$, lecz po upływie czasu t_1 , wydłużenie $\mathcal{E}(t)$ w dowolnym punkcie krzywej BC wynosi

$$\mathcal{E}(t) = \mathcal{E}(t_1) + \mathcal{E}_p (t - t_1) \quad /4/$$

przy czym $\mathcal{E}(t_1)$ jest odkształceniem wywołanym przez zmianę naprężenia od σ_0 do σ_1 bezpośrednio po osiągnięciu pełnego obciążenia P_1 .
 Wydłużenie $\mathcal{E}(t_1)$ można wyrazić zależnością



Rys. 4. Wykres rozciągania z pełzaniem liny trójkątospłotkowej ϕ 70 mm fabrycznie nowej. Długość pomiarowa liny $l_0 = 1200$ mm. Czas działania stałego obciążenia $t_p = 60$ min.



Rys. 5. Wydłużenie lin w funkcji czasu.

$$\varepsilon(t_1) = \frac{(\sigma_1 - \sigma_0)}{E_{T_1}} \quad /5/$$

gdzie: E_{T_1} jest chwilową wartością modułu sprężystości liny fabrycznie nowej przy pierwszym obciążeniu [1]

Natomiast $\varepsilon_p / t - t_1 /$ jest funkcją czasu określającą przyrost wydłużenia przy stałym obciążeniu, którą można wyrazić jako

$$\varepsilon_p = (\sigma_1 - \sigma_0) \cdot \gamma (t - t_1) \quad /6/$$

Wstawiając /5/ i /6/ do /4/, otrzymuje się zależność pomiędzy odkształceniem a czasem zwaną funkcją pełzania

$$\varepsilon(t) = (\sigma_1 - \sigma_0) \left[\frac{1}{E_{T_1}} + \gamma / t - t_1 / \right] \quad /7/$$

Funkcja pełzania charakteryzuje w pewnym stopniu własności reologiczne materiału / liny/. Wyraża mianowicie podatność na wzdłużne odkształcenia przy stałym obciążeniu.

4. Opracowanie wyników przeprowadzonych prób pełzania

Na rys. 6 przedstawiono krzywe / funkcje / krótkotrwałego pełzania dla badanych lin trójkątnospłotkowych. Przy badaniu liny \varnothing 56 mm czas działania stałego naprężenia $\sigma_1 = 28,7 \text{ daN/mm}^2$ wynosił $t_p = 30 \text{ min}$. Dla liny \varnothing 70 mm $t_p = 60 \text{ min}$, a $\sigma_1 = 25,7 \text{ daN/mm}^2$. Mimo mniejszej wartości naprężenia σ_1 , lina \varnothing 70 mm wykazała znacznie większe wydłużenie niż lina \varnothing 56 mm.

Krzywe pełzania obydwu lin są podobne i mają przebieg regularny. Dlatego wykorzystując wyniki pomiarów dla liny \varnothing 70 mm obliczono metodą regresji krzywoliniowej krzywą aproksymującą w oparciu o równanie potęgowe

$$\tilde{y} = a x^b \quad /8/$$

gdzie: $y = \varepsilon(t) - \varepsilon(t_1)$ - zmienna zależna określająca wydłużenie,

$x = t - t_1$ - zmienna niezależna określająca czas t,

a i b - współczynniki równania, które oblicza się na podstawie wyników badań metodami statystyki matematycznej [3].

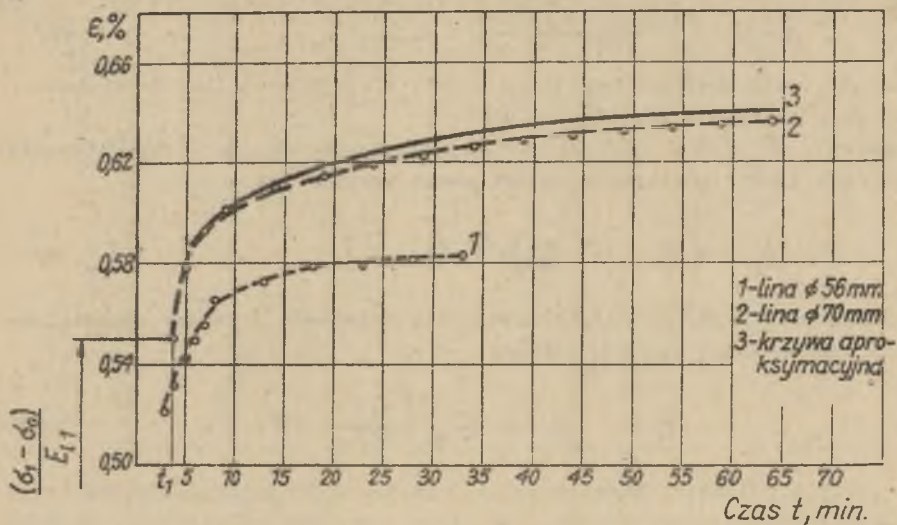
W wyniku obliczeń otrzymano

$$\tilde{y} = 0,032 x^{0,257} \quad /9/$$

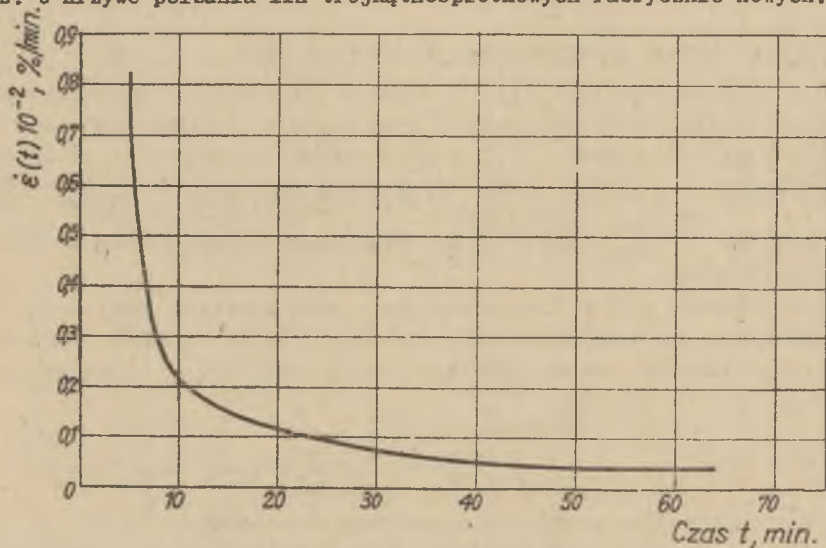
zaś funkcja pełzania ostatecznie przybiera postać

$$\varepsilon_{/t/} = 0,551 + 0,032 / t - t_1 /^{0,257} \quad /10/$$

Obliczone wg /10/ wartości $\varepsilon_{/t/}$ obrazuje krzywa 4 na rys. 6, która w minimalnym stopniu odbiega od wyników pomiarów. Otrzymana funkcja pełzania jest funkcją rosnącą z czasem, natomiast jej pochodna wyrażająca prędkość pełzania, ze wzrostem czasu maleje.



Rys. 6 Krzywe pełzania lin trójkątnospłotkowych fabrycznie nowych.



Rys. 7 Prędkość pełzania liny trójkątnospłotkowej ϕ 70 mm.

Po obliczeniu z /10/ pochodnej otrzymujemy bowiem

$$\dot{\epsilon}/t/ = 0,008224 / t - t_1 /^{-0,743}$$

/11/

której wykres przedstawiono na rys. 7. Wynika z niego, że największa prędkość pełzania / podatność liny na wydłużenie/ występuje w pierwszych kilkunastu minutach działania stałego obciążenia. Np. po upływie czasu $t = t_1 + 15$ min przyrost wydłużenia liny wynosił 0,064 %, zaś po okresie $t = t_1 + 60$ min 0,092 %. Oznacza to, że przy długości liny $L = 1000$ m bezwzględne przyrosty długości wynosiłyby 640 i 920 mm.

Należy podkreślić, że krzywą na rys. 6 obrazują i to nie w całości pierwszą fazę pełzania [5] / tzw. nieustalonego/, w której prędkość odkształceń jest zmienna i maleje z upływem czasu do pewnej wartości minimalnej $\dot{\epsilon}/t/\text{min}$. Nie można na podstawie tych krzywych wnioskować o przebiegu dalszych etapów pełzania, aż do zerwania liny. Dlatego też zależności / 10/ i / 11/ słuszne są tylko dla pewnego okresu czasu / $t - t_p$ / $\leq t_p$. Wartość graniczną t_p dla różnych konstrukcji lin i różnych obciążeń wyznaczyć należy doświadczalnie z uwzględnieniem błędów pomiarowych metody.

5. Wnioski

1. W górniczych linach wyciągowych występuje przy stałym obciążeniu zjawisko pełzania. Pierwszą fazę pełzania opisać można równaniem potęgowym ax^b o wykładniku $b < 1$.
2. Największa prędkość pełzania występuje w okresie do 15 minut działania stałego obciążenia, z tym, że na wartość pełzania mają wpływ konstrukcja, średnica i jakość wykonania liny.
3. Górnicze liny wyciągowe traktować można jako złożone ciała reologiczne. Dla określenia modelu reologicznego konieczne jest wyznaczenie charakterystyk pełzania i relaksacji lin wyciągowych różnych konstrukcji i przy różnych wartościach obciążeń.

LITERATURA

- | | | |
|-----|-------------------------------|--|
| [1] | Hankus J.: | Badanie wzdłużnych odkształceń i modułu sprężystości górniczych lin wyciągowych różnych konstrukcji. Praca doktorska GIG, Katowice 1976 r. |
| [2] | Kisiel J.: | Reologia w budownictwie "Arkady" Warszawa 1967 r. |
| [3] | Mitropolskij A.K.: | Technika statisticzeskich wyczislений. Izdatielstwo "Nauka" Moskwa 1971. |
| [4] | Praca zbiorowa: | Teoria i praktyka podiema "Naukowa Dumka", Kijów 1975 r. |
| [5] | Rabotnow J.N. i Milejko S.T.: | Kratkowremiennaja polzuczeszt Izdatielstwo " Nauka" Moskwa 1970. |
| [6] | Reiner M.: | Reologia teoretyczna PWN Warszawa 1958. |
| [6] | Sawin G.N.: | Dinamika niti prieremiennoj dliny. |
| [7] | Goroszko O.A.: | Izdatielstwo Akademii Nauk Ukrainkiej SSR Kijów 1962 r. |

О реологических свойствах горных подъемных канатов

Обсуждено результаты начальных исследований свойств реологических подъемных канатов, а также представлено кривые кратковременной ползучести определенных трехгранопрядных канатов с сердечником.

ON RHEOLOGICAL PROPERTIES OF HOISTING ROPES

The results of initial investigations on the rheological properties of hoisting ropes have been discussed and the curves of short-lasting creep of the chosen, triangularly weaved ropes have been presented.