ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ

Nr 103 Górnictwo z.8 1964

JERZY ANTONIAK

ZAGADNIENIE PEŁZANIA MATERIAŁÓW STOSOWANYCH NA WYKŁADZINY KÓŁ PĘDNYCH

Streszczenie. W artykule przedstawiono przybliżone wyniki badań nad określeniem czasu opóźnienia i współczynnika lepkości dynamicznej materiałów stosowanych na wykładziny kół pędnych. Podano sposób przeprowadzenia badań. Materiały, które poddano badaniom, to: tworzywo sztuczne na osnowie PCW, guma z przekładkami bawełnianymi oraz skóra.

1. Uwagi ogólne

W sprzężeniu ciernym stalowej liny z wykładziną koła pędnego ważną rolę odgrywają przemieszczenia wykładziny w kierunku obwodowym i promieniowym. Dotychczas przyjmowano ważność prawa Hooke'a dla materiałów stosowanych na wykładziny, jednakże liczne badania przeprowadzone przez autora na kołach pędnych wykazały, że dla takich materiałów jak: skóra, guma z przekładkami bawełnianymi oraz tworzywo sztuczne na osnowie polichlorku winylu, jest to założenie dalekie od rzeczywistości. Stwierdzono, że odkształcenia wykładzin rosną z czasem podczas stałego obciążenia i po odciążeniu maleją wraz z upływem czasu.

2. Rozważania teoretyczne w oparciu o przyjęty model reologiczny materiału wykładziny

W celu uchwycenia czasowej zmienności właściwości mechanicznych wykładziny przyjęto najprostszy model Kelvina-Voigta [1] odpowiadający ciału lepko-sprężystemu, gdzie efekty sprężyste podlegają prawu Hooke'a a lepkie hypotezie tarcia

wewnętrznego Newtona. Schematycznie model ten można przedstawić jako równoległe połączenie sprężyny (s) i tłumika olejowego (t) rys. 1. W połączeniu tym wydłużenie (skrócenie)

$$\varepsilon_s = \varepsilon_t = \varepsilon$$

a naprężenie

$$\sigma = \sigma_t + \sigma_s.$$

Zgodnie z prawem Hooke'a

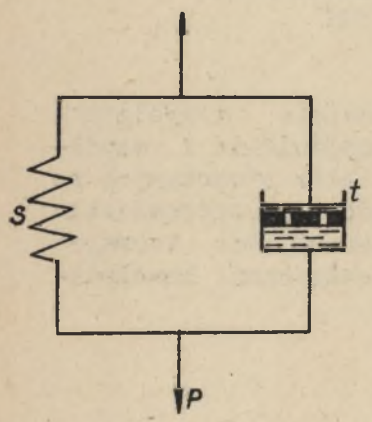
$$\sigma_s = E.\varepsilon_s$$

oraz według prawa Newtona

$$\sigma_t = \eta . \dot{\varepsilon}_t$$

gdzie

$$\dot{\varepsilon}_t = \frac{\partial \varepsilon}{\partial t}.$$



Rys. 1. Model mechaniczny dwuparametrowy (sprężyna i tłumik) modelu ciała Kelvina-Voigta

Z powyższych zależności po przekształceniach otrzymuje się równanie podające zależność między naprężeniem i odkształceniem w postaci różniczkowej

$$\sigma = \sigma(t) = (E + \eta . \frac{\partial}{\partial t}) . \varepsilon(t) \qquad (1)$$

Po scałkowaniu równania (1) względem czasu, przy założeniu, że dla $t < 0$ jest $\varepsilon(t) = \sigma(t) = 0$ oraz że w chwili $t = 0^+$ przyłożono obciążenie zmieniające się w czasie, otrzymuje się

$$\varepsilon(t) = \frac{H(t)}{\eta} . \int_0^t \sigma(\tau) . \exp(-\frac{t-\tau}{\lambda}) . d\tau \qquad (2)$$

gdzie:

H(t) - funkcja Heaviside'a o następujących własnościach
$H(t) = 0$ dla $t \leqslant 0$
$H(t) = 1$ dla $t > 0$

$\lambda = \frac{\eta}{E}$ - stosunek współczynnika lepkości dynamicznej do modułu sprężystości na ściskanie - tzw. czas opóźnienia.

Przechodząc do wykładziny zamontowanej na kole pędnym upraszczając zagadnienie, założono jednoosiowy stan naprężenia oraz zmianę naprężenia w czasie podnoszenia ciężaru $S_1 > S_2$ według równania

$$\sigma(t) = \left[\sigma_0 - \sigma_Q \cdot \exp\left(-\mu \cdot (\pi - \omega \cdot t)\right)\right] \cdot \left[H(t) - H(t-t_1)\right] \qquad (3)$$

gdzie:

μ - współczynnik sprzężenia, wartość graniczna,

ω - prędkość kątowa koła pędnego w czasie ruchu ustalonego,

t_1 - czas po którym odciążono wykładzinę, odpowiadający obrotowi koła o kąt π,

$\sigma_0 = \frac{S_1}{R \cdot s}$ - naprężenie promieniowe odpowiadające naciągowi liny S_1,

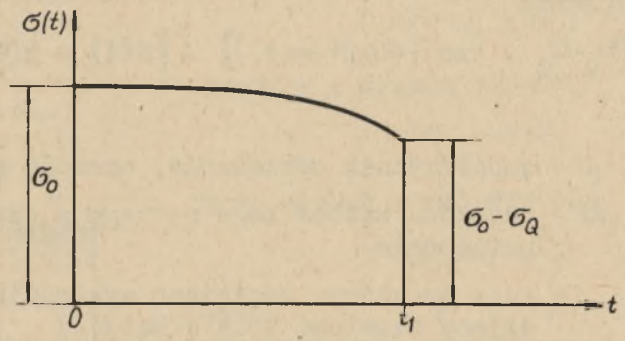
$\sigma_Q = \frac{Q}{R \cdot s}$ - naprężenie promieniowe odpowiadające ciężarowi użytecznemu Q,

S_1, S_2 - naciągi liny po obu stronach koła pędnego $S_1 = S_2 + Q$,

R - promień koła pędnego,

s - szerokość przylegania liny do wykładziny.

Rys. 2 przedstawia wykres zmiany naprężenia promieniowego wykładziny w czasie. Po wstawieniu równania (3) w (2) i po wykonaniu całkowania otrzymuje się wzór (4) na zależność odkształcenia od czasu dla $0^+ \leqslant t \leqslant t_1$



Rys. 2. Przebieg naprężenia promieniowego wykładziny koła pędnego w czasie

$$\varepsilon(t) = \frac{1}{E} \cdot \left[\sigma_0 - \exp\left(-\frac{t}{\lambda}\right) \cdot \left\{\sigma_0 - \sigma_Q \cdot \frac{1}{1+\lambda \cdot \mu \cdot \omega} \cdot \exp(-\mu\pi)\right\} - \right.$$

$$\left. - \sigma_Q \cdot \frac{1}{1+\lambda\mu\omega} \cdot \exp(-\mu\pi) \cdot \exp(\omega \cdot t \cdot \mu)\right] \qquad (4)$$

Analizując funkcję $\varepsilon(t)$ daną równaniem (4) dla warunków koła pędnego a więc dla:

σ_0 - const,

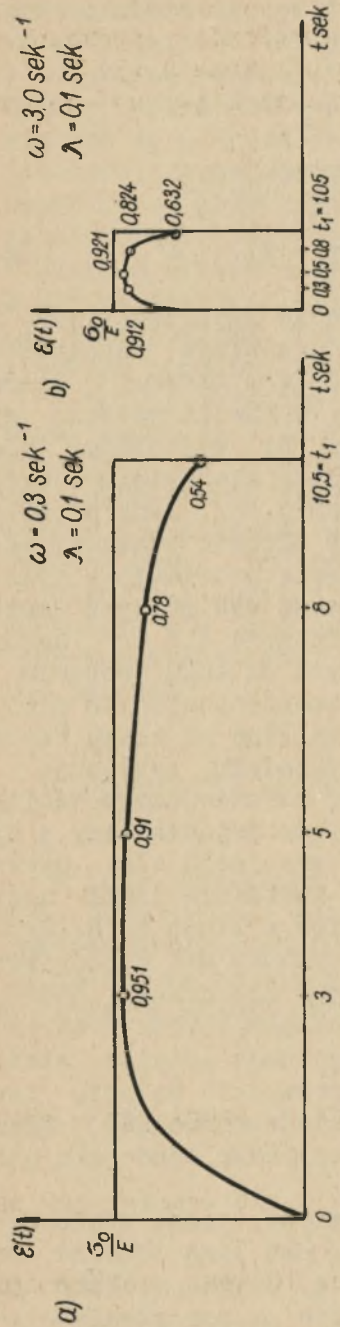
σ_Q - $0{,}25 \cdot \sigma_0$ = const,

μ - 0,8 - const,

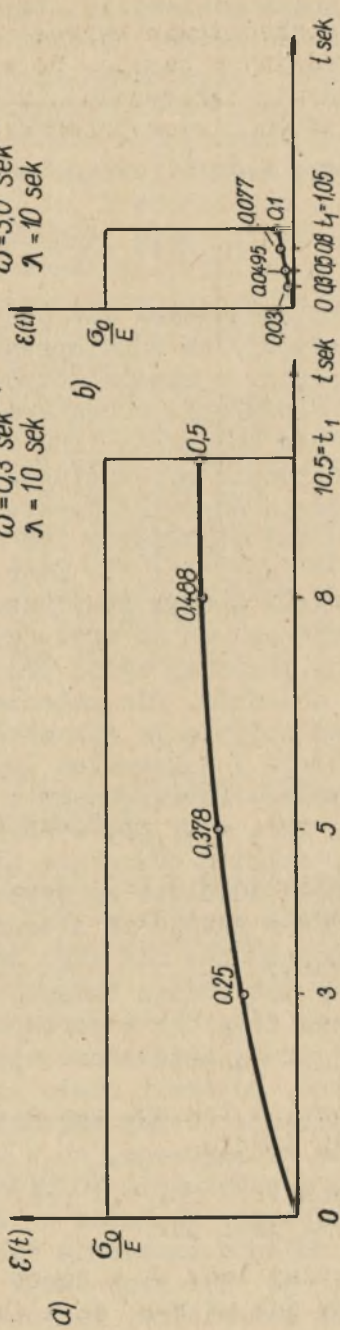
ω - const i tak np. raz $\omega = 0{,}3$ sek^{-1}, drugi raz $\omega = 3{,}0$ sek^{-1}, dla

λ - const < 1 np. 0,1 sek, otrzymuje się wykresy jak na rys. 3a i 3b.

Dane jak wyżej lecz λ = const > 1 np. 10 sek, otrzymuje się wykresy jak na rys. 4a i 4b.



Rys. 3. Przebieg odkształcenia w czasie dla λ = 0,1 sek i zmiany naprężenia w czasie jak na rys. 2



Rys. 4. Przebieg odkształcenia w czasie dla λ = 10 sek. i zmiany naprężenia w czasie jak na rys. 2

Ogólnie można stwierdzić, że dla λ i ω odpowiednio dużego, wyrażenie będące członem równania (4)

$$\sigma_Q \cdot \frac{1}{1+\mu\omega\lambda} \cdot \exp(-\mu\pi) \cong 0$$

wobec czego wzór (4) przechodzi w następujący

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E} \cdot (1 - \exp(-\frac{t}{\lambda})) \qquad (4a)$$

A zatem wykładzina nie odczuwa spadku naprężenia rys. 2, który występuje na łuku opasania i o przebiegu odkształcenia wykładziny w czasie decydować będzie w głównej mierze wielkość naprężenia początkowego σ_0. W chwili wejścia wykładziny pod obciążoną linę o naciągu S_1 występuje zjawisko opóźnienia sprężystego. Wykładzina nie osiąga w ogóle odkształcenia odpowiadającego naprężeniu σ_0 lecz przybliża się do tej wartości w tym dłuższym okresie czasu im większe jest λ (rys. 3 i 4). Mierząc ugięcie promieniowe wykładziny na kole pędnym przy różnych ω oraz dla różnych materiałów stosowanych na wykładziny, otrzymuje się za każdym razem inny przebieg ugięć promieniowych na łuku opasania i na całym obwodzie. Dla materiałów charakteryzujących się dużym czasem opóźnienia odkształcenie zależne od czasu bardzo powoli maleje i maksymalne ugięcie wykładziny występuje w czasie obrotów koła pędnego w miejscu najmniejszego naciągu liny S_2 (np. rys. 4), a więc w miejscu zejścia liny z wykładziny, całkiem odwrotnie niż przy przyjęciu dla wykładziny modelu idealnie sprężystego. O kształcie linii ugięcia nie można sądzić ze stosunku napięć w linie S_1/S_2. Rys. 3 i 4 są sporządzone dla tego samego stosunku sił S_1/S_2. Przeprowadzone dotychczas badania wykładzin dla czasu jednego obrotu koła długiego w porównaniu z czasem obrotu w okresie normalnej pracy urządzenia wyciągowego dają jedynie wyniki przybliżone. Autorowi udało się przeprowadzić badania tensometryczne wykładziny skórzanej w czasie normalnej pracy urządzenia wyciągowego, co w danym przypadku oznaczało jazdę naczyń z szybkością 10 m/sek.

Bez głębszego wnikania w istotę rzeczy, można stwierdzić, że stałe malenie promienia wykładziny pod liną idąc od naciągu S_1 do S_2 przy dużym λ rys. 4, mające miejsce dla niektórych materiałów, ma poważny wpływ na sprzężenie cierne poprzez inną niż przy przyjęciu modelu ciała idealnie

sprężystego dla wykładziny względną prędkość pełzania liny po wykładzinie.

Szybkość pełzania wykładziny (nachylenie stycznej do krzywej pełzania) w odpowiadających sobie chwilach jest tym większa im większe jest przyłożone naprężenie. Drgania liny podłużne i poprzeczne, opory w szybie, okresy rozruchu i hamowania, są przyczyną zmiany S_1 i odpowiednio σ_c, co z kolei prowadzi do różnych szybkości pełzania wykładziny, od kształceń w tych samych punktach koła pędnego, a zatem wykładzina znajduje się w stanie nieustalonego pełzania. Wobec tego pełzanie wykładziny będzie się zmieniać w obszarze zawartym pomiędzy skrajnymi krzywymi.

W teorii pełzania znane są modele ciał np. Burgersa, Zernera, Maxwella i inne wieloparametrowe, które może bardziej przybliżyłyby rozważania teoretyczne do rzeczywistości, jednak zastosowanie tych modeli do rozważań nad zagadnieniem pełzania wykładziny w dwuosiowym stanie naprężenia nastręczałoby duże trudności. Z tego powodu jak i innych przedstawionych w dalszej części pracy autor wybrał model Kelvina-Voigta dla określenia czasu opóźnienia i współczynnika lepkości dynamicznej materiałów stosowanych na wykładziny kół pędnych.

3. Określenie czasu opóźnienia i współczynnika lepkości dynamicznej

W celu określenia czasu opóźnienia i współczynnika lepkości dynamicznej materiałów stosowanych na wykładziny kół pędnych przeprowadzono badania tensometryczne próbek wykładzin, opierając się na następujących założeniach: dane jest obciążenie związkiem

$$\sigma(t) = \sigma_0 \cdot [H(t) - H(t-t_1)] \tag{5}$$

wstawiając (5) w (2) otrzymuje się dla

$$t \leqslant t_1$$

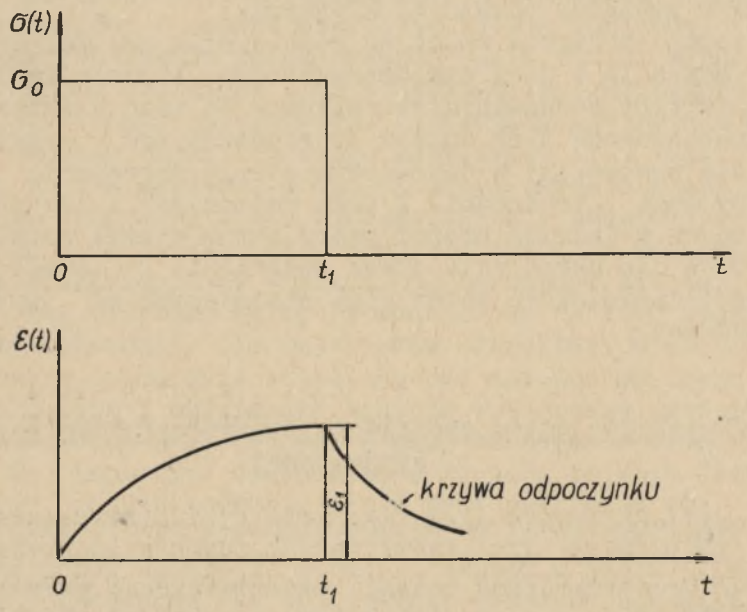
$$\sigma(t) = \sigma_0 \cdot \frac{1}{E} \cdot (1 - \exp(-\frac{t}{\lambda})) \tag{6}$$

oraz dla

$$t \geqslant t_1$$

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 \cdot \frac{1}{E} \cdot \exp(-\frac{t}{\lambda}) \cdot (\exp(\frac{t_1}{\lambda}) - 1) = \varepsilon_1 \cdot \exp(-\frac{t}{\lambda}) \quad (7)$$

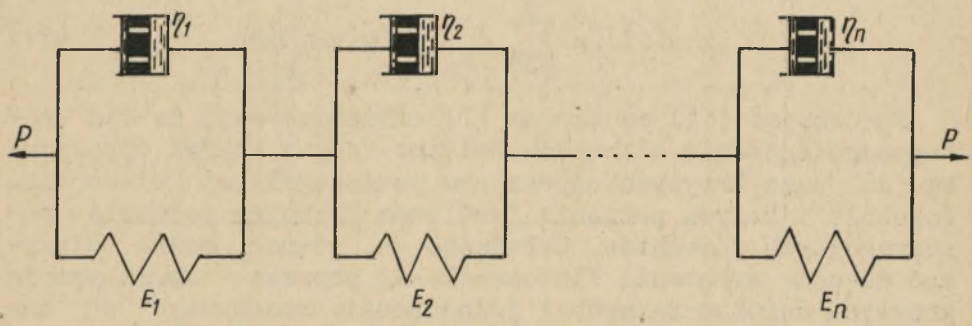
Zależności te przedstawia rys. 5. Czas opóźnienia λ można dobierać aproksymując uzyskaną doświadczalnie krzywą pełzania lub krzywą wypoczynku. Następnie znając moduł sprężystości na ściskanie E można z dość dobrym przybliżeniem określić współczynnik lepkości dynamicznej.



Rys.5. Przebieg naprężenia promieniowego i odkształcenia wy kładziny koła pędnego w czasie dla λ i ω odpowiednio dużego

Oceniając na podstawie powyższych zależności wyniki badań laboratoryjnych stwierdza się, że model Kalvina - Voigta dla podanych materiałów jest zbyt ubogi jako zawierający tylko jeden parametr, czas opóźnienia λ i jedynie dla pewnych ograniczeń czasowych odpowiada warunkom rzeczywistym. Zakres ważności jednej wartości czasu opóźnienia dla tworzywa sztucznego nie przekracza 5 do 10 sek. Powyżej danego

zakresu należałoby przyjmować inną wartość czasu opóźnienia. Wydaje się jednak, że otrzymane przybliżenia są dość dobre ze względu na to, że właśnie w tych zakresach czasowych pracuje wykładzina koła pędnego w czasie ruchu ustalonego urządzenia wyciągowego. Dla lepszego odzwierciedlenia rzeczywistości w szerszym zakresie czasowym, należałoby przyjąć model ciała składający się z n elementów Kelvina-Voigta łączonych w szereg rys. 6. Materiały odpowiadające



Rys. 6. Model mechaniczny ciała składającego się z n elementów Kelvina-Voigta łączonych w szereg

temu modelowi zachowują się tak, jakby ich struktura zawierała n układów sprężyna-tłumik, każdy o własnym czasie od działywania. Otrzymuje się w ten sposób n parametrów czasów opóźnienia $\lambda_r = \eta_r/E_r$ $(r = 1,2,...n)$. Odkształcenie całkowite ε będzie sumą odkształceń poszczególnych elementów

$$\varepsilon(t) = \sum_{r=1}^{n} \varepsilon_r(t) \tag{8}$$

a ponieważ w każdym z elementów panuje to samo naprężenie

$$\sigma(t) = E_r \cdot (1 + \lambda_r \cdot \frac{\partial}{\partial t}) \varepsilon_r(t) \tag{9}$$

to eliminując ze związków (8) i (9) wielkość ε_r i po transformacjach Laplace'a otrzymuje się

$$\varepsilon(t) = H(t) \cdot \sum_{r=1}^{n} \frac{1}{\eta_r} \cdot \int_0^t \sigma(\tau) \cdot \exp\left(-\frac{t-\tau}{\lambda_r}\right) \cdot d\tau \qquad (10)$$

Przyjmując w równaniu (10), że do chwili $t = 0^+$ ciało znajdowało się w stanie beznaprężeniowym oraz, że $\sigma(t) = \sigma_o \cdot [H(t) - H(t-t_1)]$ po wykonaniu przepisanego całkowania dla $t \geqslant t_1$ otrzymuje się

$$\varepsilon(t) = \sum_{r=1}^{n} \varepsilon_r \cdot \exp\left(-\frac{t}{\lambda_r}\right) \qquad (11)$$

Porównując (11) ze wzorem (7) stwierdza się, że dla szeregowego łączenia elementów Kelvina-Voigta krzywa odpoczynku jest sumą krzywych odpoczynku poszczególnych elementów. Podobnie i krzywa pełzania jest sumą krzywych pełzania poszczególnych elementów. Układając n równań, można otrzymać dogodne wyrażenia dla określenia poprzez aproksymację krzywych doświadczalnych i jednocześnie rozszerzyć w ten sposób przedział ważności otrzymanych wyników. Zarówno w modelu Voigta jak i w jego rozszerzeniu zakłada się, że krzywa pełzania pod obciążeniem i przy wypoczynku przebiega identycznie, co rzecz jasna nie odpowiada wynikom badań.

Przechodząc od rozważań teoretycznych do badań laboratoryjnych należałoby wyjaśnić zagadnienie czasu wejścia wykładziny pod pełne obciążenie na kole pędnym. Na rys. 2 i 5 czas wejścia wykładziny pod obciążenie jest równy zero, natomiast na kole pędnym upływa pewien czas od chwili zetknięcia się liny z wykładziną do przejęcia przez wykładzinę pełnego obciążenia. Dla wykładziny idealnie sprężystej jest to czas jaki upływa od chwili gdy $\Delta R = 0$ do chwili gdy $\Delta R = \Delta R_{max}$, dla wykładziny jako ciała lepko-sprężystego czas wejścia będzie krótszy. Czas wejścia można określić następująco

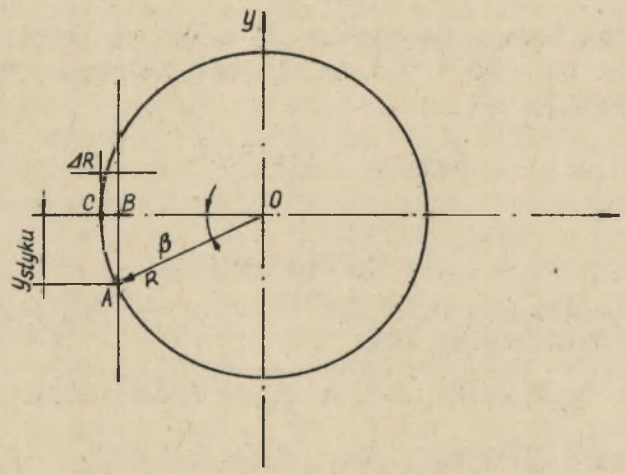
$$t_w = \frac{R \cdot \beta}{v} = \frac{\beta}{\omega} \qquad (12)$$

gdzie:

R - promień koła pędnego do dna rowka wykładziny,

β - kąt środkowy odpowiadający łukowi wejścia rys. 7,

v - prędkość obwodowa koła.



Rys. 7. Schemat do określenia czasu wejścia elementu wykładziny pod pełne obciążenie

Znając równanie okręgu i równanie cięciwy w układzie współrzędnych x, y rys. 7 można określić rzędną punktu styku liny z wykładziną

$$y = \pm\sqrt{R^2 - x^2} \tag{13}$$

$$x = R - \Delta R \tag{14}$$

z rozwiązania układu równań (13) i (14) otrzymuje się

$$y_{styku} = -\sqrt{2.R.\Delta R - \Delta R^2} \tag{15}$$

Z trójkąta ABO wylicza się kąt środkowy odpowiadający łukowi wejścia

$$\sin\beta = \frac{1-\sqrt{2.R.\Delta R-\Delta R^2}}{R} \qquad (16)$$

Dla małych kątów jest

$$\sin\beta \cong \beta.$$

I tak np. dla koła o promieniu R = 300 cm stwierdzono doświadczalnie np. ΔR = 0,1 cm (wykł. skórzana) wobec tego z (15) otrzymuje się

$$y_{styku} = -7{,}75 \text{ cm}$$

oraz

$$\beta = 0{,}0258 \text{ radiana.}$$

Czas wejścia dla $\omega = 0{,}15$ sek^{-1} oraz $\omega = 3{,}0$ sek^{-1} wyniesie odpowiednio według (12)

$$t_w = 0{,}172 \text{ sek} \quad \text{i} \quad t_w = 0{,}0086 \text{ sek.}$$

Dla wykładziny gumowej i np. ΔR = 0,3 cm

$$y_{styku} = -13{,}4 \text{ cm} \qquad \beta = 0{,}0446 \text{ radiana}$$

i czasy wejścia odpowiednio

$$t_w = 0{,}298 \text{ sek} \quad \text{i} \quad t_w = 0{,}0149 \text{ sek.}$$

Zwis liny w kołach pędnych naziemnych, drgania liny, wielkość ΔR, promień koła wydłużają lub skracają czas wejścia wykładziny pod pełne obciążenie nawet w czasie ruchu ustalonego urządzenia wyciągowego.

Przedstawiony powyżej czas wejścia odnosi się do kierunku promieniowego, nieco inny będzie czas wejścia wykładziny pod pełne obciążenie w kierunku stycznym. Czas ten jest większy co wynika z tego, że w miejscu pełnego zetknięcia się płytki z liną pkt B na rys. 7 następuje gwałtowny wzrost przegięcia płytki i siła wywierana przez tę płytkę odkształconą na sąsiednie wchodzące dopiero w styk z liną lub też na jeszcze dalsze jest znaczna. W czasie pomiarów tensometrycznych wykładziny skórzanej na szybie "Gwarek"[3]stwier

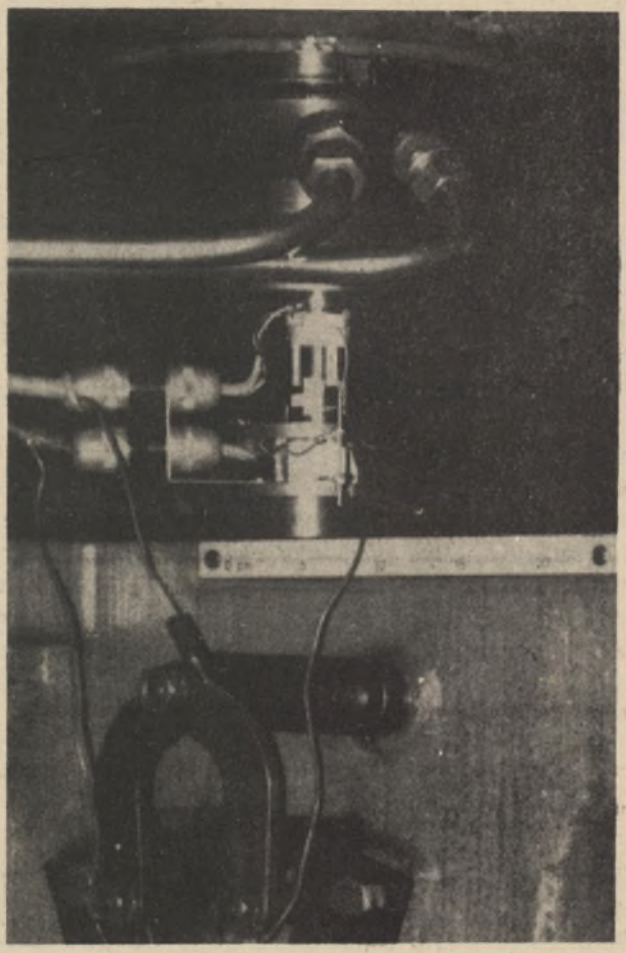
dzono, że ilość płytek znajdujących się w strefie wstępnych przegięć stycznych była różna dla podnoszenia ciężaru S_1 i dla opuszczania ciężaru S_1. Zmieniała się także w zależności od prędkości obwodowej koła. I tak np. dla opuszczania ciężaru S_1 kąt środkowy odpowiadający strefie wstępnych przegięć wynosił od 9° do $10^\circ 40'$, natomiast dla podnoszenia od $16^\circ 30'$ dla prędkości obwodowej $v = 1,5$ m.sek^{-1} do $20^\circ 10'$ dla $v = 10$ m.sek^{-1}. Wykładzina koła pędnego skórzana. Wyliczone czasy wejścia pod pełne obciążenie wykładziny w kierunku stycznym dla promienia koła $R = 3720$ mm, wyniosły 0,71 sek. i 0,131 sek.

Czas wejścia w sposób istotny wpływa na prędkość odkształcenia, która z kolei decyduje o kształcie krzywej naprężenie-odkształcenie. Ponieważ czas wejścia zmienia się dla poszczególnych elementów wykładziny, można wysunąć, tezę, że prawie każdy element wykładziny pełznie inaczej na łuku opasania i w ciągu jednego wyciągu. Otrzymuje się w ten sposób fale pełzania i na skutek pełzania liny na aktywnym łuku opasania nierównomierne zużywanie wykładziny na całym obwodzie koła pędnego. W badaniach laboratoryjnych próbek wykładzin otrzymano czasy wejścia pod pełne obciążenie w granicach od kilku sekund do 0,5 sek. Na otrzymanie mniejszych czasów wejścia nie zezwalała konstrukcja maszyny wytrzymałościowej.

4. Metody i wyniki badań

Próbki walcowe oraz prostopadłościenne wycięte z płytek wykładziny poddano ściskaniu na maszynie wytrzymałościowej Schoppera z regulacją szybkości od 5 do 200 mm/min. Próbki walcowe posiadały stosunek wysokości do średnicy $h/d = 0,5$, a w prostopadłościennych współczynnik kształtu wynosił $a.b/2.(a+b).h = 0,5$ i wykonane były z następujących materiałów: z tworzywa sztucznego na osnowie polichlorku winylu, z gumy z przekładkami bawełnianymi oraz ze skóry [4]. Próbki były ściskane w ten sam sposób w jaki są ściskane na kole pędnym, a więc np. przekładki bawełniane w próbce wyciętej z wykładziny gumowej ułożone były równolegle do kierunku działania siły ściskającej.

Do badań skonstruowano specjalny czujnik przedstawiony na zdjęciu rys. 8, który składał się zasadniczo z dwóch czę



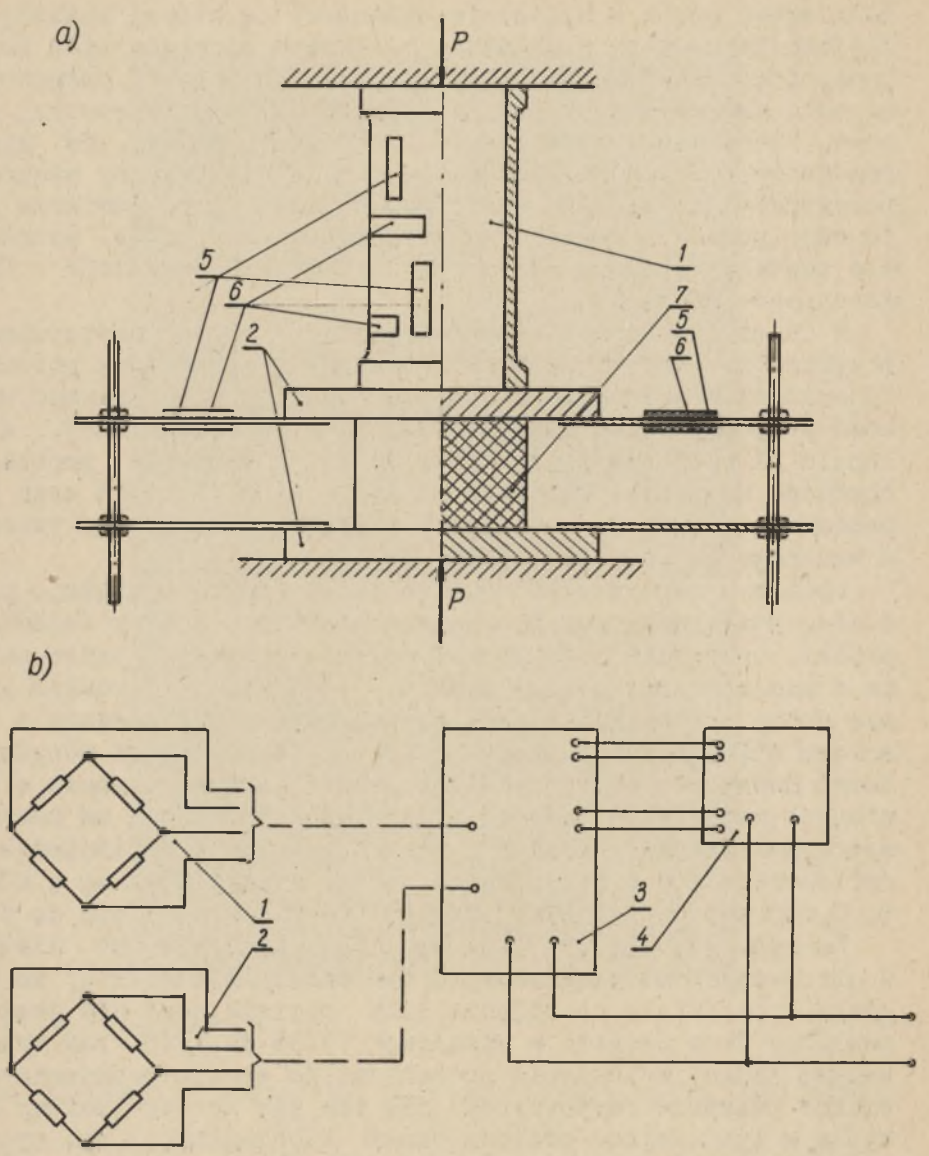
Rys. 8. Czujnik tensometryczny składający się z szczelinomierza i dynanometru

ści: część górna w kształcie cylindra, na której zostały naklejone tensometry w układzie mostkowym mierzące siłę ściskającą, część dolna składająca się z dwóch płytek połączonych ze sobą na sztywno blaszkami zaopatrzonymi w tensometry oporowe, które mierzyły wielkość ściśnięcia próbki. Na rys. 9 przedstawiono schemat czujnika i układ elektryczny połączeń. Potwierdzające się dwa wzorcowania przed i po pomiarze rys. 10 dają pewność prawidłowego działania czujników. Wzorcowanie zostało wykonane na zrywarce f-my VEB Werkstoff Prüfmaschinen-Leipzig.

W czasie pomiarów tensometrycznych użyto następujących przyrządów: wzmacniacz tensometryczny trójkanałowy produkcji "Chemiter" oraz oscyloskript. Na kanale I rejestrowano wielkość proporcjonalną do występującej siły ściskającej, a na kanale II wielkość proporcjonalną do ściśnięcia próbki. Na obydwóch kanałach pracowano na zakresie 0,1%, 0,2% oraz przy pomiarze ściśnięcia w czasie badania materiału z tworzywa sztucznego na zakresie 0,05%.

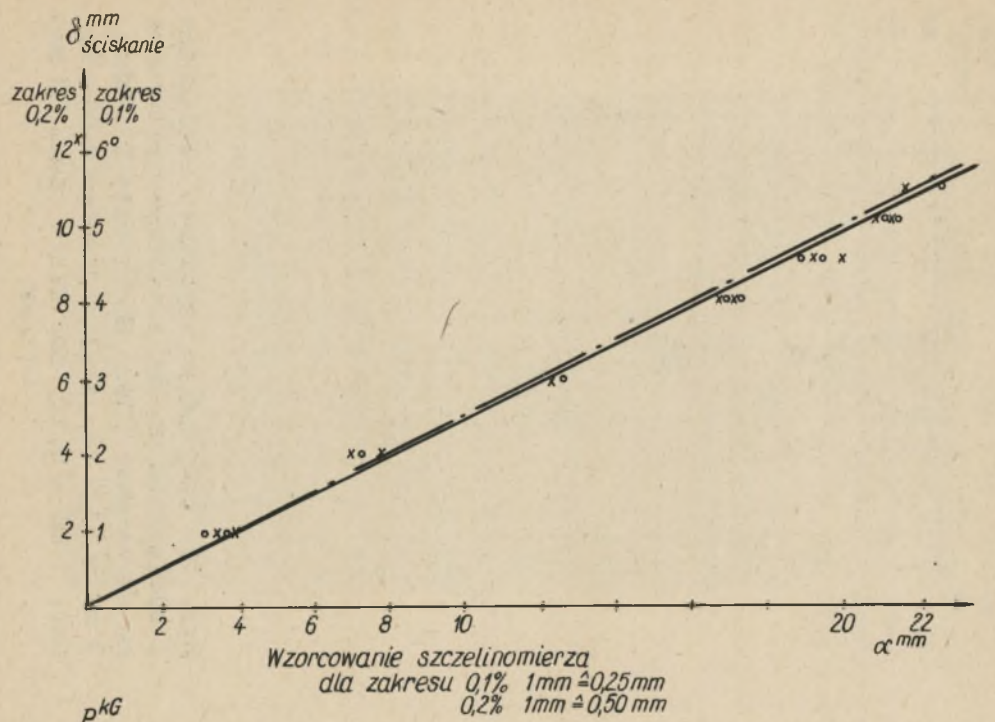
Pomiar przeprowadzono następująco: próbki obciążano przez 4 min. stałą siłą i w tym czasie mierzono zmiany ściśnięcia próbki, następnie momentalnie odejmowano siłę i przez następne 4 min. mierzono zmiany wysokości próbki. Pod koniec badania danej próbki kilka razy bardzo szybko przykładano i odejmowano siłę, mierząc odkształcenia próbki. Oprócz powyższych badań dodatkowo przeprowadzono na próbkach wykonanych z omówionych materiałów badania statycznego ściskania na maszynie wytrzymałościowej "Amsler" prowadząc odczyt ściśnięcia na deflektrometrze o dokładności jednej kreski 0,01 mm a odczytu 0,003 mm, odczyt siły odbywał się z dokładnością do 1 kG.

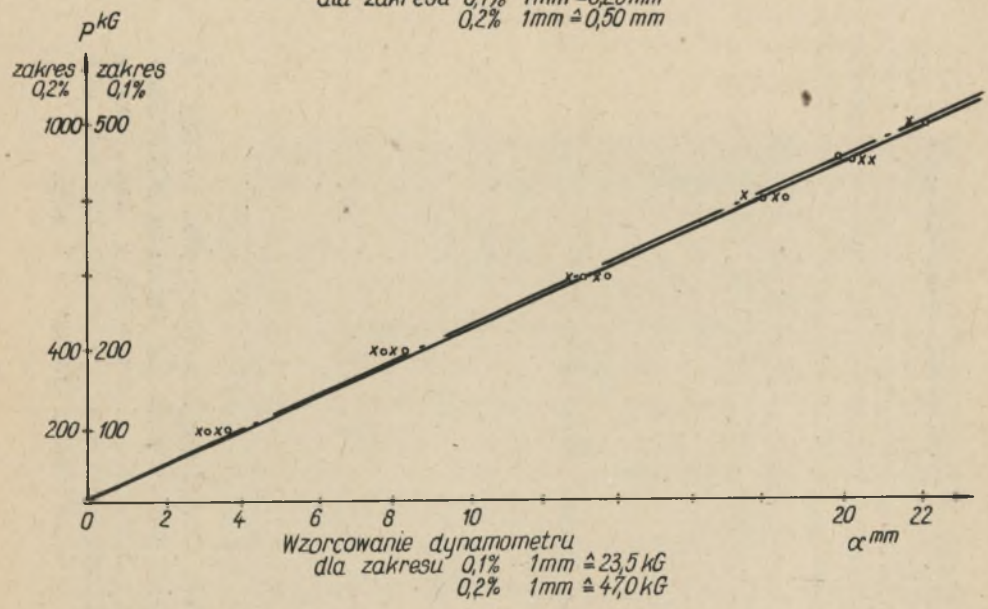
Na rys. 11, 12, 13, 14 i 15 i 16 przedstawiono niektóre z otrzymanych oscylogramów. I tak należy stwierdzić, że reagowanie materiału na zdjęcie siły obciążającej nie jest momentalne lecz zawarte w granicach 1/50 do 1/40 sek oraz że krzywa zmiany ściśnięcia przechodzi po pewnym promieniu w odwrotne pełzanie (wypoczynek) nie tak jak krzywa zmiany siły, która w tym miejscu posiada punkt nieciągłości np. rys. 11 punkt A. Jeśliby więc odjęcie i ponowne przyłożenie siły ściskającej trwało krócej niż 1/50 sek, materiał z tworzywa sztucznego nie zareagowałby na to zmianą ściśnięcia. Na rys. 12 otrzymano wyraźne potwierdzenie wywodów teoretycznych, przeprowadzonych odnośnie wzoru (4), gdyż zmniejszenie siły ściskającej (odcinek BC o wartości 106 kG) w czasie 0,15 sek nie spowodowało zmniejszenia ugięcia próbki, lecz wręcz od-



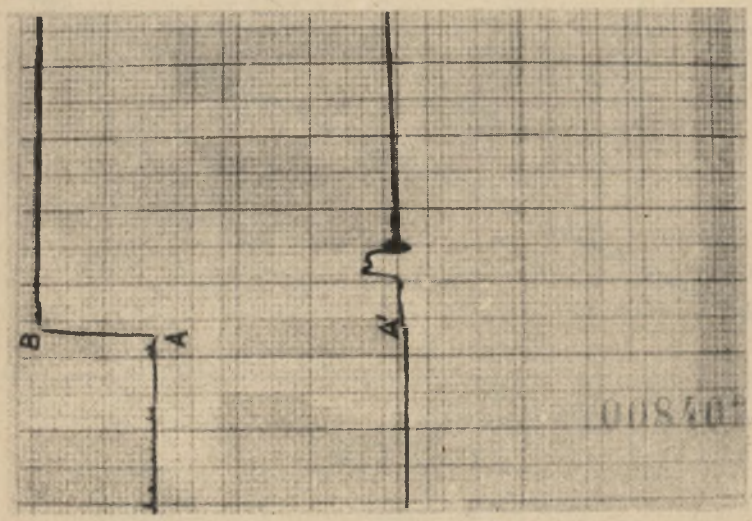
Rys. 9

a) schemat czujnika, b) schemat połączeń elektrycznych
1 - czujnik pomiaru siły (dynamometr), 2 - czujnik pomiaru ściśnięcia (szczelinomierz), 3 - wzmacniacz tensometryczny "chemiter", 4 - osciloskript, 5 - tensometry robocze, 6 - tensometry kompensacyjne, 7 - próbka

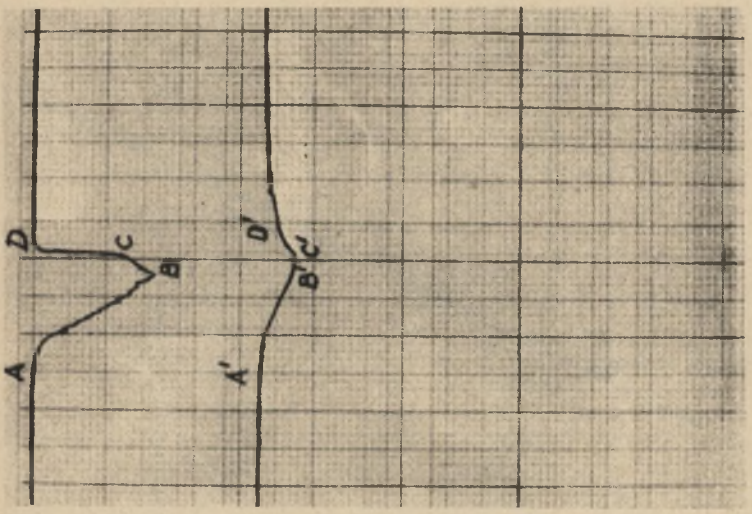




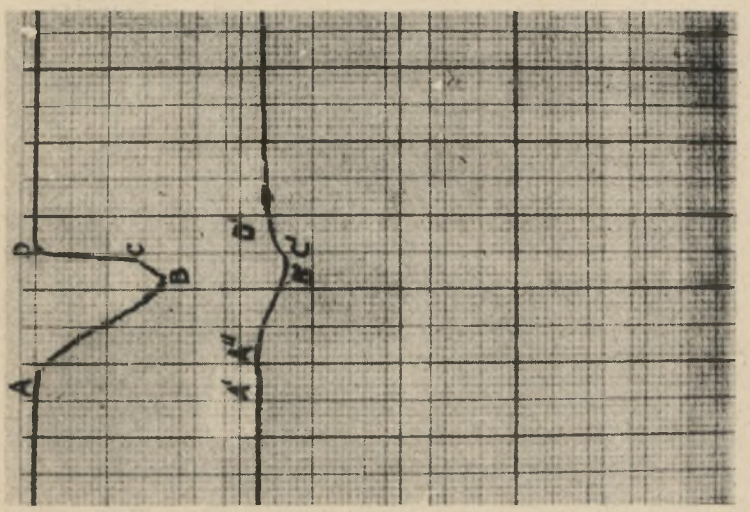
Rys. 10. Wzorcowanie szczelinomierza i dynamometru



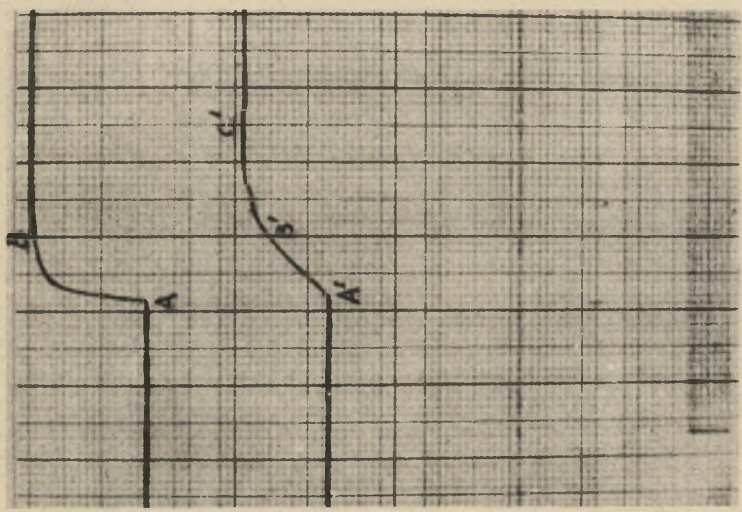
Rys. 11. Oscylogram odpoczynku próbki z tworzywa sztucznego na osnowie PCW. Skala siły I kanał, 1 mm ≈ 23,5 kG, skala ściśnięcia II kanał, 1 mm ≈0,125 mm, skala czasu 20 mm ≈ 1 sek.



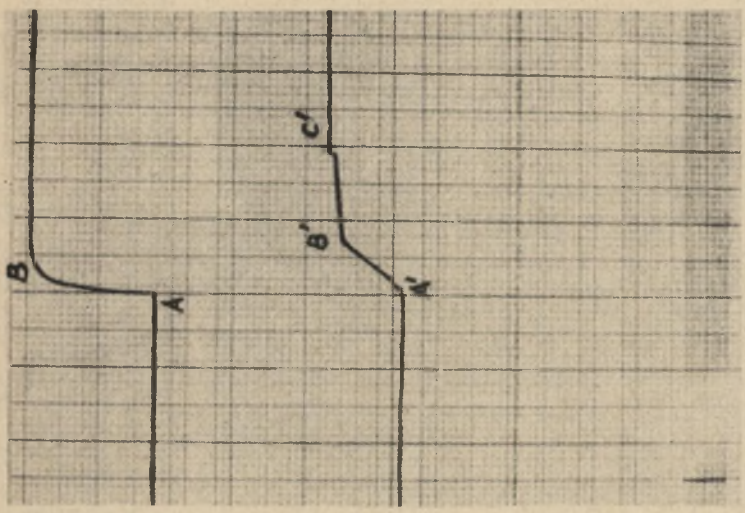
Rys. 12. Oscylogram szybkiego obciążenia i odciążenia próbki z tworzywa sztucznego na osnowie PCW. Skala siły I kanał, 1 mm ≈ 23,5 kG, skala ściśnięcia II kanał, 1 mm ≈ 0,125 mm, skala czasu 20 mm≈ ≈1 sek.



Rys. 13. Oscylogram szybkiego obciążenia i odciążenia próbki z tworzywa sztucznego na osnowie PCW. Skala siły I kanał, 1 mm≈ ≈23,5 kG, skala ściśnięcia II kanał, 1 mm≈ ≈0,125 mm, skala czasu 20 mm ≈ 1 sek



Rys. 14. Oscylogram odpoczynku próbki z gumy z przekładkami bawełnianymi ułożonymi równolegle do kierunku działania si ły ściskającej. Skala siły I kanał, 1 mm ≈ 23,5 kG, skala ściśnięcia II kanał, 1 mm ≈ 0,5 mm, skala czasu 20 mm ≈ 1 sek.



Rys. 15. Oscylogram szybkiego obciążenia i odciążenia próbki z gumy. Skala siły I kanał, 1 mm ≈ 23,5 kG, skala ściśnięcia II kanał, 1 mm ≈ 0,5 mm, skala czasu 20 mm ≈ ≈1 sek.

Rys. 16. Oscylogram odpoczynku próbki ze skóry o płaszczyznach sklejenia równoległych do kierunku działania siły ściskającej. Skala siły I kanał, 1 mm ≈ 23,5 kG, skala ściśnięcia II kanał, 1 mm ≈ 0,250 mm skala czasu 20 mm ≈ 1 sek.

wrotnie ściśnięcie próbki w dalszym ciągu wprawdzie wolniej rosło, odcinek B' C'. Szybkie przyłożenie siły i odciążenie próbki zawarte w granicach 1 sek rys. 12 i 13, próbka odczuła jako niepełne obciążenie i odpowiadające ściśnięcie wyniosło zaledwie 1/3 ściśnięcia, które otrzymano po długotrwałym obciążaniu próbki tą samą siłą rys. 11. Takie zachowanie się materiału świadczy o dużej wartości współczynnika lepkości. Charakterystyczną cechą materiału z tworzywa sztucznego jest to, że mimo wzrostu siły obciążającej próbka w pewnym zakresie nie ściska się lecz wydłuża rys. 13 punkt A". Tak więc należy zauważyć, że moduły natychmiastowe, a więc zarówno punktowy $d\sigma/d\varepsilon$ jak i sieczny σ/ε są funkcją naprężenia i dla tworzywa sztucznego zmieniają się w szerokim zakresie. Jeśli próbka posiada już pewne ściśnięcie i ponownie przyłożyć siłę ściskającą to w pewnym zakresie odkształceń (początkowych) ma się do czynienia z ujemnym modułem natychmiastowym, dalej z dodatnim o bardzo dużych wartościach aby w okresie mniej więcej ustalonego pełzania otrzymać względnie stałą wartość, malejącą ze wzrostem naprężenia. Wzrost szybkości obciążania próbki zaznacza się silnie wzrastającym modułem sprężystości, który dla obliczonego skrócenia jednostkowego bierzącego i np. prędkości posuwu maszyny wytrzymałościowej 200 mm/min wynosi w początkowym okresie odkształcenia 1750 kG/cm^2, podczas gdy przy prędkości posuwu maszyny 20 mm/min wynosił 450 kG/cm^2. Przyjmując do oceny wyników badań jednoparametrowy model Kelvina-Voigta a zatem i stały czas opóźnienia należy pamiętać o tym, że ze zmianą modułu sprężystości zmieniać się będzie także współczynnik lepkości.

Materiałem o mniejszym czasie opóźnienia jest guma z przekładkami bawełnianymi. Przy całkowitym odciążeniu próbki po czasie nieco mniejszym od 1 sek ma się z powrotem do czynienia z początkowymi wymiarami próbki. A zatem jeśli obrót koła pędnego o kąt π jest większy od 1 sek powrót wykładziny do wymiarów początkowych jest zapewniony. Godne uwagi jest to, że po szybkim odciążeniu wykładziny występuje minimalne przekroczenie wymiarów początkowych (punkt B' rys. 15) oraz zmiana krzywizny krzywej wypoczynku (odcinek A B rys. 14.) Odnośnie tego zjawiska należy zauważyć, że próbkę wykładziny stale obciążał ciężar 1,5 kG i podniesienie ciężaru na wysokość około 0,2 mm wymagało wykonania przez próbkę wykładziny pracy $3 \cdot 10^{-4}$ kGm.

Tablica 1

Wyniki badań

Materiał próbki	Czas t sek	Moduł sprężystości na ściskanie kG.mm^{-2} przy prędkości posuwu maszyny wytrzymałościowej mm.min^{-1}					Czas opóźnienia sek przy prędkości posuwu maszyny wytrzymałościowej mm.min^{-1}								Współczynnik lepkości dynamicznej kG.sek.mm^{-2} przy prędkości posuwu maszyny wytrzym. mm.min^{-1}							
							ściskanie					wypoczynek			ściskanie					wypoczynek E = 2 kG.mm^{-2}		
		v=5	v=15	v=20	v=200		v=5	v=15	v=20	v=200					v=5	v=15	v=20	v=200				
Tworzywo sztuczne na osnowie polichlorku winylu PCW-W4	0,25	-	-	-	-4,36	+∞	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,5	-	-	-	(∓∞	20,9	-	-	-	-	0,254	-	-	-	-	-	-	-	5,3	-	-	-
	0,75	-	-	-	15,90	14,30	-	-	-	0,365	0,366	-	-	-	-	-	-	5,81	5,27	-	-	-
	1,00	-	4,91	5,2	11,6	10,40	-	0,896	-	0,436	0,465	12,05	21,3	15,3	-	4,41	-	5,06	4,8	24,1	42,6	30,6
	3,00	4,05	4,06	4,8			1,34	1,25	-	-	-	↓	↓	↓	5,43	5,07	-	-	-	↓	↓	↓
	5,00	4,06	4,07	4,41			2,17	1,94	-	-	-	20,6	28,6	23,5	8,82	7,89	-	-	-	41,2	57,2	47,0
	10,00	3,61	2,91	3,82			4,16	3,18	-	-	-				15,0	9,25	-	-	-			
	20,00	3,14					7,01	-	-	-	-				22,0	-	-	-	-			
	26,00	3,08					8,14	-	-	-	-				25,0	-	-	-	-			
	65,00	2,05					14,1	-	-	-	-	37,6	51,7	45,1	28,9	-	-	-	-	75,2	103	90,2
	190,00	↓					-	-	-	-	-	55,6	69,6	62,3	-	-	-	-	-	111	139	124,6
	260,00	1,90	1,92	1,98	2,3	2,08	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	sek	v=25	v=40	v=50	v=100		v=25	v=40	v=50	v=100					v=25	v=40	v=50	b=100		E = 1 kG.mm^{-2}		
Guma z przekładkami bawełnianymi	0,25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,59	0,516	0,458	-	-	-	-	-	0,59	0,52	0,46
	0,50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,472	0,43	0,442	-	-	-	-	-	0,47	0,43	0,44
	1,00	1,42	1,09	1,21	0,856	0,712	0,72	0,794	0,81	0,71	0,632	0,42	0,505	0,409	1,02	0,87	0,98	0,61	0,45	↓	↓	↓
	2,00	1,19	↓	↓	0,76	0,795	1,32	↓	↓	1,16	1,09	0,81	0,96	0,82	1,57	↓	↓	0,88	0,86	0,81	0,96	0,82
	3,00	1,29	0,75	1,22	0,732	0,78	1,92	2,11	2,19	1,39	1,36	1,16	1,35	1,18	2,48	1,58	2,67	1,02	1,22	1,15	1,35	1,18
	4,00	1,09			0,899	0,913	2,38			1,36	1,31	1,59	1,68	1,52	2,61			1,22	1,2	1,59	1,68	1,52
	4,50	↓	↓	↓	1,11	1,03	↓	↓	↓	1,06	0,956	↓	↓	↓	↓	↓	↓	1,17	0,98	↓	↓	↓
	5,00	1,10	0,883	1,025			2,82	2,81	3,1	-	-	1,98	2,1	1,89	3,11	2,48	3,18	-	-	1,98	2,1	1,89
	8,00	1,21	↓	1,15			3,77	↓	3,41	-	-	2,88	3,24	3,04	4,56	↓	3,92	-	-	2,88	3,24	3,04
	10,00	1,24	1,18	1,165			4,16	3,39	3,78	-	-	-	↓	↓	5,17	4,00	4,40	-	-	-	↓	↓
	68,00	↓	↓	↓			-	-	-	-	-	-	16,2	19,2	-	-	-	-	-	-	16,2	19,2
	200,00	1,08	0,97	1,016	1,05	0,99	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Identyczne badania przeprowadzono na próbce wykładziny skórzanej, gdzie płytki skóry o grubości 5 mm były ze sobą sklejone. Płaszczyzny sklejenia były równoległe do kierunku ściskania. Odciążenie próbki ze skóry charakteryzuje się załamaniem krzywej wypoczynku punkt B' rys. 16 oraz właściwie odcinkami prostymi łączącymi punkt A' z B' i B' z C'. Nadmienić należy, że spęcznienie próbki z tworzywa sztucznego było równomierne we wszystkich kierunkach w płaszczyznie poziomej. Natomiast spęcznienie próbki z gumy z przekładkami bawełnianymi i skórzanej lepionej z płytek, było tylko w kierunku prostopadłym do przekładek i powierzchni zlepienia. Wyniki obu typów badań zestawiono w tablicy 1.

5. Uwagi końcowe

Głębsze wniknięcie w istotę sprzężenia ciernego stalowej liny z wykładziną koła pędnego wymaga uwzględnienia własności reologicznych materiałów wykładzin. Dotychczasowe etapy poznawania sprzężenia ciernego opierały się na następujących założeniach: idealnie sztywne koło i wykładzina, lina giętka, nierozciągliwa, nieważka, niesprężysta i wolna od naprężeń zginających (Euler-Eytelwein XVIII w.) dalszy etap idealnie sztywne koło i wykładzina, lina sprężysta (Żukowski XIX w.), dalej idealnie sztywne koło, wykładzina i lina sprężyste (Popowicz, Pichot i inni, druga połowa XX w.) dalsze rozwinięcie to sprężyste koło, wykładzina ciało lepkosprężyste i lina sprężysta.

Przedstawione w artykule uwagi odnośnie pełzania materiałów stosowanych na wykładziny kół pędnych nie rozwiązują w formie zamkniętej tak wielce złożonego problemu. Wprowadzając do rozważań bardziej skomplikowane modele ciał lepkosprężystych można by dokładniej odzwierciedlić stan rzeczywisty, jednak ten sposób prowadzi do zawiłych zależności o wielu współczynnikach wyznaczanych empirycznie, które z kolei ograniczają znaczenie stosowalności tych modeli. W tej sytuacji wydaje się, że przybliżenie otrzymane na podstawie modelu Kelvina-Voigta zapewnia dość poprawne wyniki co najmniej w interesujących autora charakterystycznych przedziałach pełzania materiałów stosowanych na wykładziny kół pędnych.

LITERATURA

[1] Nowacki W.: Teoria pełzania. Arkady W-wa 1963 r.

[2] Bland D.R.: The theory of linear viscoelasticity. Oxford 1960 r.

[3] Antoniak J.: Wykładziny kół pędnych, badania i doświadczenia ruchowe. Maszyny Wyciągowe. Materiały i referaty na Konferencję Naukowo-Techniczną ZUT "Zgoda" i Katedry Maszyn Górniczych Pol. Śl. SIiTMP Katowice 1963 r.

[4] Antoniak J., Orlacz J.: Własności mechaniczne i ruchowe wykładzin kół pędnych. Zeszyty Naukowe Pol. Śl. Górnictwo 5. 1963 r.

[5] Blizard R.B.: Viscoelasticity of Rubber. J. Appl. Phys. 22:730 1951 r.

Rękopis złożono w Redakcji w dniu 4.X.1963

ВОПРОС ТЕКУЧЕСТИ МАТЕРИАЛОВ ПРИМЕНЯЕМЫХ НА ФУТЕРОВКИ ШКИВОВ ТРЕНИЯ

Р е з ю м е

В статье даются приближённые результаты исследований по определению периода запаздывания и коэфициента динамической вязкости материалов применяемых на футеровки шкивов трения. Приведён способ проведения исследований. Материалы, которые подвергались исследованиям это: пластмасса основанная на ПЦВ, резина с хлопковыми прослойками и кожа.

GREEPING OF SHEAVE LINNING MATERIALS

S u m m a r y

In the paper, approximate test results on the time of de lay and coefficient of dynamic viscosity were presented.The technique of the tests is given. Plastic on the polyvinyl chloride base, rubber sandwiched with cotton and leather were tested.