

OKTAWIAN POPOWICZ

RUCHY WZGLĘDNE LINY I WYKŁADZINY NA KOLE PĘDNYM

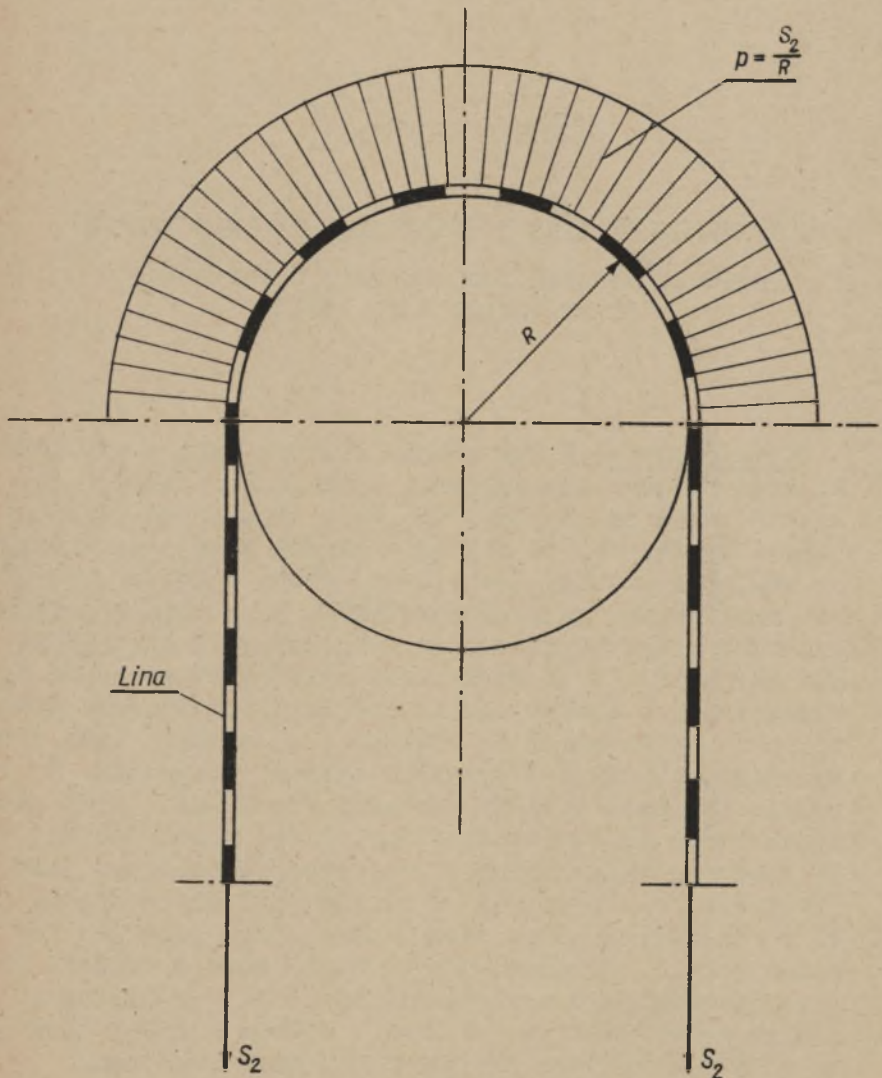
(Referat przeznaczony na Berg.u.Hüttentag
we Freibergu w r. 1961)

Streszczenie: W sprzężeniu ciernym liny z wykładziną koła pędnego oba elementy pracujące podlegają odkształceniom sprężystym. Wynikają stąd ruchy względne liny i wykładziny po obwodzie tarczy koła oraz wzajemne względem siebie. Rozpatrzono ruchy liny po wykładzinie traktowanej jako niesprężysta, a następnie przeanalizowano wpływ sprężystości wykładziny. W szczególności zaznacza się on wtedy, gdy wykładzina wykonana jest z materiału o bardzo niskim module sprężystości. Wykładzina z płytek gumowych ciętych z odłożonych taśm transporterowych stanowi przykład takiego przypadku. Do zupełnie błędnych wyników prowadzi rozumowanie przy założeniu zupełnej sztywności liny, które można spotkać w literaturze zagranicznej. Teoretycznie możliwym jest przypadek, w którym nie ma ruchów względnych między liną i wykładziną, przy pewnym określonym stosunku ich sprężystości. Wskazano drogę, która może prowadzić do eksperymentalnego znalezienia wartości sprężystości, wzdłużnej wykładziny. Na koniec omówiono ruchy obrotowe liny pod wpływem obciążenia ciężarem własnym.

Uwagi wstępne

Lina naciągnięta siłą "S" kG, która opasuje żłobek koła o promieniu "R" cm, ciśnię nań siłą promieniową, która w odniesieniu do cm długości obwodu styku w przekroju prost-

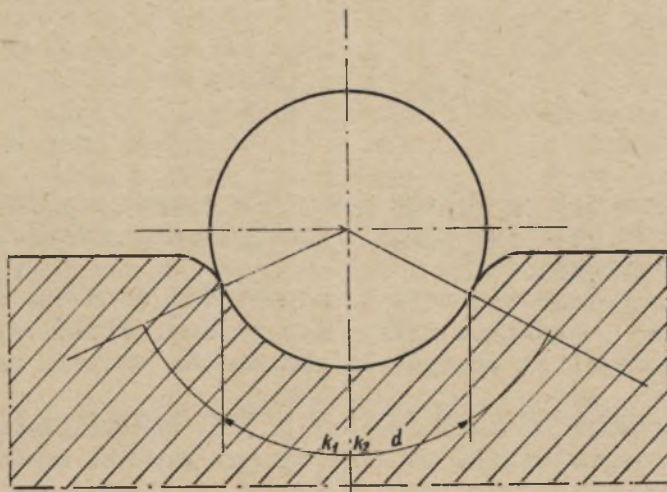
padłym do osi koła - rys.1 - wynosi $P = \frac{S}{R}$ kG/cm. Ta siła daje ciśnienie powierzchniowe w żłobku zależne od konstrukcji



Rys.1. Opasanie koła pędnej lina

liny i wykonania żłobka. Przyjmuje się - rys.2 - że ciśnienie to działa na części średnicy liny i wynosi $p = \frac{S}{Rk_1k_2d}$ kG/cm². Współczynnik k_1 podaje zależność od konstrukcji liny i ma wartość $k_1 = 1$ dla liny budowy zamkniętej, 0,75

dla liny ze skrętek owalnych lub trójkątnych, 0,35 dla zwykłych lin współzwitych 0,25 dla przeciwwzitych ze skrętek



Rys.2. Przyleganie liny do żłobka

okrągłych. Odciski ostatnio wymienionych lin przedstawia rys.3. Współczynnik k_2 wynosi $k_2 = 0,95$ dla żłobka z obrzeżem bez odchyłki liny, $k_2 = 0,3$ dla takiego żłobka z odchyłką, $k_2 = 0,4$ dla bębna z wykła-

a)

b)



Rys.3a,b. Odciski liny

a) współzwitej, b) przeciwwzitej

dziną żłobkowaną i $k_2 = 0,25$ dla bębna gładkiego. Przyjęto praktycznie liczyć umowną wartość średniego nacisku powierzchniowego przy różnych naciągach liny po obu stronach koła:

$$p = \frac{S_1 + S_2}{2 d R}$$

Tak liczony nacisk na kołach pędnych wyciągów szybowych wynosi najczęściej 14 - 18 kG/cm. Trafiają się przypadki, gdzie nacisk jest wyższy.

W polskim górnictwie najwyższe wartości dochodzą do $p = 24$ kG/cm², jednakże tylko 7% z ogólnej ilości około 200 kół pędnych objętych statystyką przekracza wartość nacisku 18 kG/cm².

Przy nierównym obciążeniu liny po obu stronach koła pędnego sprzężenie cierne wynika ze statycznego warunku równowagi się:

$$d S = \mu P R d\varphi = \mu S d\varphi$$

skąd tylko dla przypadku $\mu = \text{const.}$ wynika znana formuła:

$$S_1 \leq S_2 e^{\mu \alpha}$$

Zależność współczynnika tarcia od wielkości nacisku powierzchniowego była badana przez wielu badaczy i wiadomym jest, że dla materiałów takich z jakich wykonywana jest wykładzina współczynnik tarcia spada przy wzroście nacisku. Ten spadek jest biorąc na ogół nieduży, a ponieważ różnica naciągów jest również niewielką, gdyż $S_1 - S_2 \leq 0,4 S_2$ ze względu na pewność ruchu sprzężenia, więc założenie $\mu \neq f(S)$ można przyjmować dla obliczeń pewności ruchu jako dostatecznie dokładne przybliżenie.

Zależność współczynnika tarcia od kąta φ wynika tylko ze zmienności naciągu wzdłuż łuku opasania, jeśli układ jest nieruchomy. Z chwilą gdy występuje ruch koła zachodzą przesunięcia względne, których szybkość zależy od φ . Zbadanie zależności współczynnika tarcia od tych szybkości było tematem

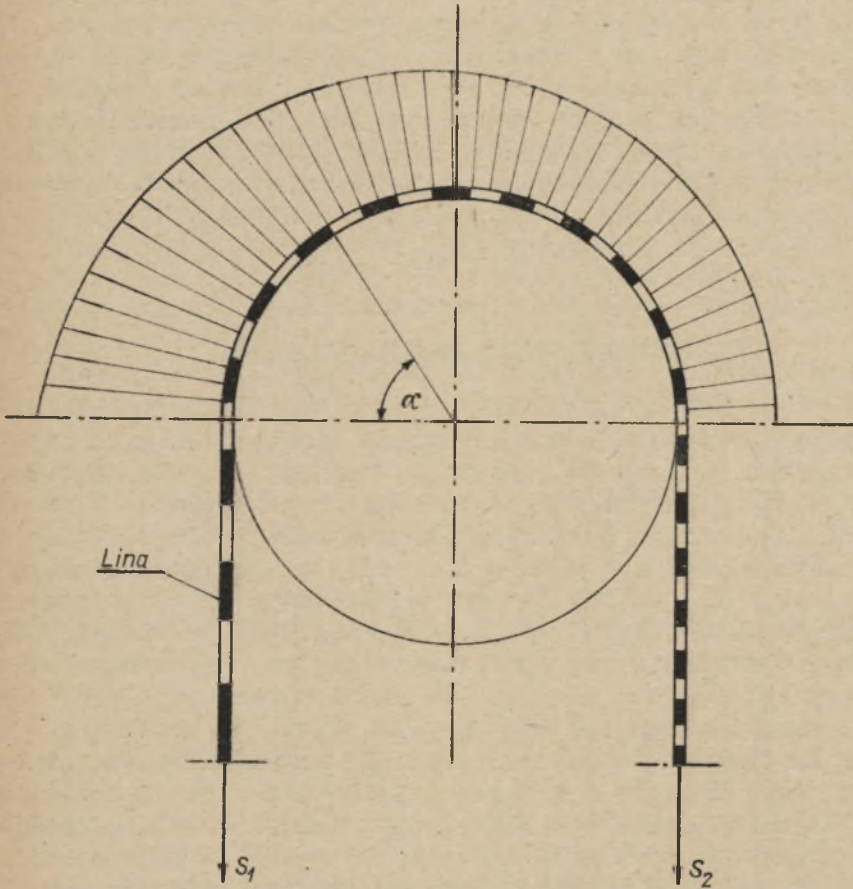
prac badawczych dopiero w ostatnich latach. Z tych prac wynika, że dla obliczeń pewności ruchu sprzężenia może wystarczyć założenie przybliżone $\mu = \text{constans}$ na całym łuku opasania. Jednakże wniknięcie w istotę sprzężenia i poznanie jego mechanizmu wymaga ściślejszego ujęcia i dokładniejszego rozpatrzenia tych zależności z uwzględnieniem sprężystych odkształceń tak liny jak i wykładziny koła. Odkształcenia samego korpusu koła pędnego, które wykonuje się zawsze spawane ze stali, można pominąć ze względu na ich małe wartości nie mające wpływu na ruchy względne. Wyjątkiem może tu być tylko przypadek zwykłego bębna, gdzie ugięcie płaszcza może wpływać na zmniejszenie naciągu i kurczenie się nawijanej liny.

Pełzanie wskutek sprężystości liny

W pewnych przypadkach można pominąć sprężystość wykładziny, ze względu na brak jej, albowiem jej rodzaj i sposób umocowania, które nie dopuszczają godnych uwagi odkształceń. W takim razie, jeśli lina po jednej stronie koła podlega obciążeniu w ten sposób, że $S_1 > S_2$ i jeśli to obciążenie nastąpi spokojnie i bez wstrząsów przy zahamowanym kole, powstanie stan przedstawiony na rys.4. Elementy liny po stronie obciążonej wydłużając się, przesuwały się po nieruchomym żłobku, a przy założeniu $\mu = \text{const}$. te ruchy ograniczają się do części α łuku opasania tak, że $S_1 = S_2 e^{\mu\alpha}$. Na pozostałej części łuku przesunięć nie ma. Jeśli po założeniu klatki lub skipu koło zacznie się obracać spokojnie i bez wstrząsów, lina po stronie obciążonej będzie się nawijać w stanie naciągniętym i wystąpi stan przedstawiony na rys.5, w którym zmiany naciągów liny i nacisków na żłobek przedstawiają się jako sama logarytmika jak na rys.4, przesunięta o $\pi - \alpha$ w kierunku ruchu koła. Ten obraz nie zmienia się przy dalszym obrocie, bo elementy liny zbiegające z koła podlegają skurczowi, który zaznacza się na całej części α łuku opasania. Ta część nazywa się częścią skuteczną, bo na niej zachodzi przenoszenie obciążenia liny ładunkiem $S_1 - S_2$. Na skutecznej części łuku lina ruchem robaczkowym ucieka w kierunku przeciwnym do ruchu koła na stronę bardziej obciążoną. Ruch ten zwany pełzaniem liny jest koniecznym następstwem jej sprężystości i przenoszenia przez koło momentu obciążenia.

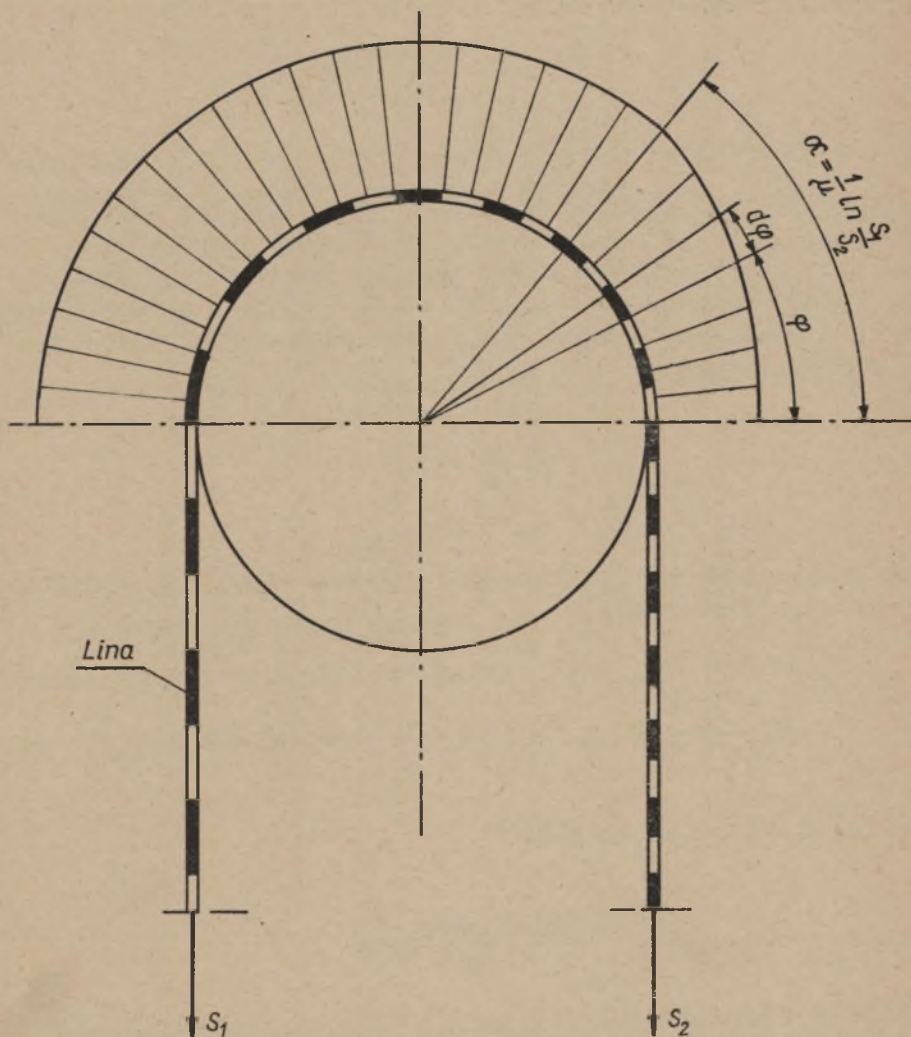
Już kilkadziesiąt lat temu Żukowski [1] przeprowadził dla napędu pasowego dowód eksperymentalny, że łuk opasania dzieli

się na część skuteczną która przenosi cały moment i część jałową, która nie uczestniczy w przenoszeniu go. Obserwacje i doświadczenia, potwierdzające taki sam stan rzeczy na ko-



Rys.4. Naciągi liny i naciski na żłobek w czasie załadowania klatki

łach pędnych wyciągów szybowych, przeprowadzone przez autora niniejszej pracy, były już publikowane dawniej i od tej pory znane są dalsze publikacje potwierdzające zjawisko pełzania i rozdział łuku opasania na dwie części [5]. Jako dalszy dowód pełzania liny mogą służyć znane w ruchu szybowym nie-



Rys.5. Naciągi liny i naciski na żłobek w czasie podnoszenia

zgodności wskazań głębokościomierza, kiedy ta sama strona wy-
ciągu jest trwale więcej obciążona. Spotyka się określenie
szybkości peźzania formułą:

$$v_p = v \frac{S_1 - S_2}{E f}$$

gdzie "v" jest szybkością jazdy, "E" modułem sprężysto-
ści liny, "f" jej przekrojem, Ta formuła nie odpowiada rze-
czywistej szybkości peźzania, podając jedynie jej górną gra-
nicę, która zasadniczo zachodzi tylko w jednym skrajnym punk-
cie łuku opasania. Długość łuku skutecznego przy założeniu
 $\mu = \text{const.}$ wynosi:

$$\alpha = \frac{1}{\mu} \ln \frac{S_1}{S_2}$$

a skrócenie liny na tym łuku pod wpływem przejścia z naciągu
 S_1 na S_2 jest równe:

$$\int_0^{\alpha} \frac{S_1 - S_2}{E f} e^{\mu\varphi} R d\varphi = \frac{R}{E f} \frac{1}{\mu} (S_1 \ln \frac{S_1}{S_2} - S_1 + S_2)$$

Czas obrotu o kąt α wynosi:

$$\frac{R\alpha}{v} = \frac{R}{\mu v} \ln \frac{S_1}{S_2}$$

a zatem średnia szybkość peźzania:

$$v_{p \text{ sr}} = \frac{v}{E f} \left(S_1 - \frac{S_1 - S_2}{\ln \frac{S_1}{S_2}} \right)$$

Przy obrocie o $d\varphi$ łuk $\alpha - \varphi$ kurczy się o

$$\frac{S_2}{E f} (e^{\mu\alpha} - e^{\mu\varphi}) R d\varphi$$

a ponieważ dzieje się to w czasie $\frac{Rd\varphi}{v}$ więc szybkość pełzania przekroju leżącego na kącie φ wynosi:

$$v_p = \frac{v}{E f} (S_1 - S_2 e^{\mu\varphi})$$

stąd wynika szybkość pełzania dla $\varphi = 0$ tj. na końcu łuku skutecznego przy zejściu liny z koła

$$v_{p \max} = \frac{v}{E f} (S_1 - S_2)$$

a na początku łuku skutecznego: $v_{p \min} = 0$
 W przeciętnych warunkach można przyjąć: $\frac{S_1}{S_2} \approx 1,4$

oraz $\frac{S_1}{E f} \approx 0,002$, stąd:

$$v_{p \text{śr}} = 0,000302 v$$

$$v_{p \max} = 0,000571 v$$

Badania współczynników tarcia przy szybkościach pełzania dla różnych materiałów wykładzin w różnych warunkach smarowania i wilgotności powierzchni i przy różnych ciśnieniach powierzchniowych prowadzili w Polsce Stachurski [2] [4] i Hajduk [3]. Oba autorzy określają szybkość pełzania niezbyt ściśle formułą $v_p = \frac{v}{E f} (S_1 - S_2)$, jednak na podstawie metod pomiarowych tych badań, wyniki można przyjąć jako miarodajne dla rzeczywistych szybkości pełzania. Ponieważ w pracy liny na wykładzinie nie samo tylko tarcie w ścisłym znaczeniu tego wyrazu decyduje o sprzężeniu, przyjęto określenie współ-

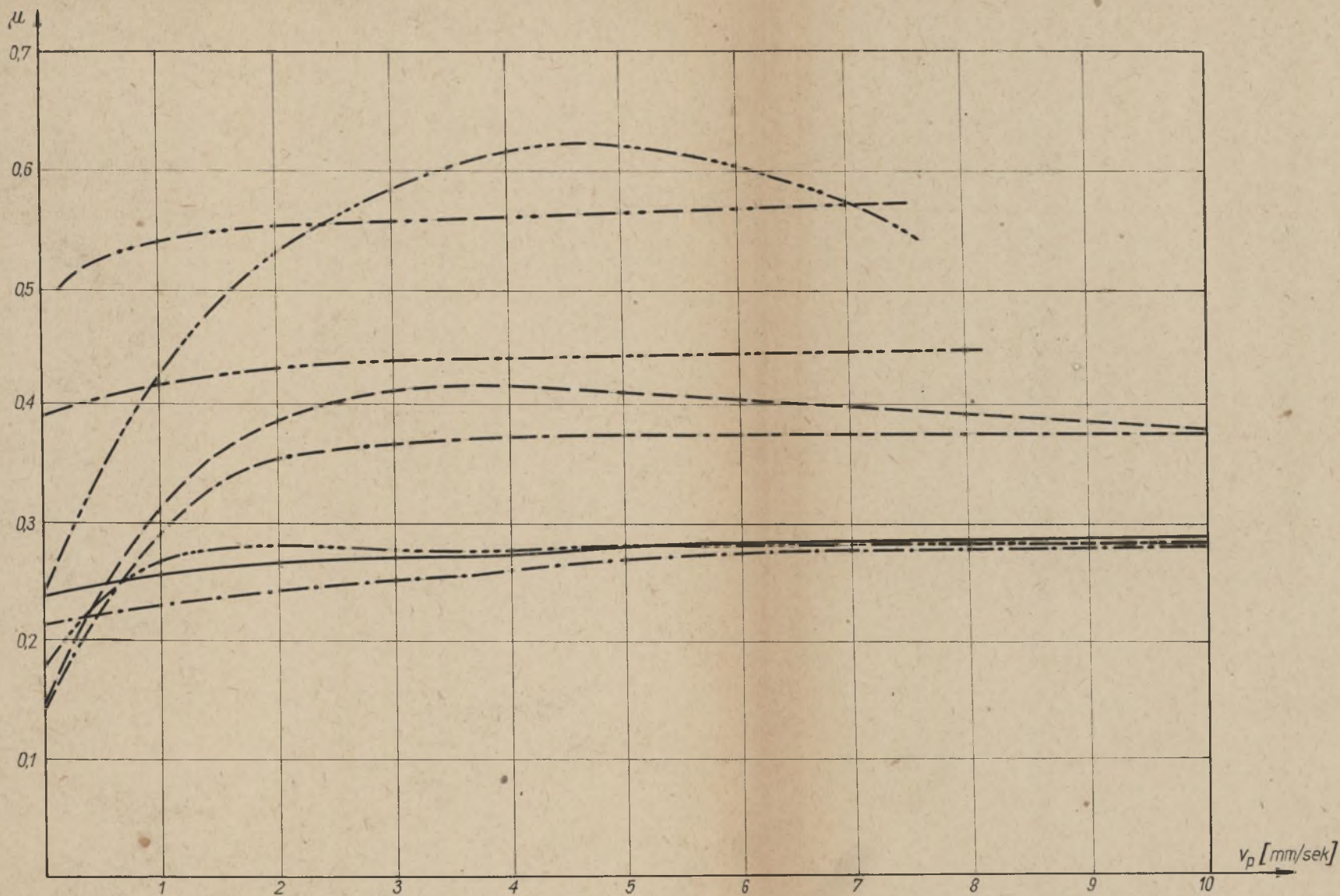
czynnika μ jako współczynnik sprzężenia, względnie zabierania. Rys.6 i 7 przedstawiają niektóre wyniki badań laboratoryjnych Stachurskiego i Hajduka ujęte w porównawcze wykresy. Wpływ wielkości nacisku jest wyraźny, a wpływ szybkości pełzania w zakresie małych szybkości jest bardzo duży. Wykresy te potwierdzają, że założenie $\mu = \text{const.}$ można przyjmować dla obliczeń pewności ruchu, gdyż odchyłki są nieduże w zakresie zmian nacisków i szybkości, jakie zachodzą w normalnych warunkach ruchu. Jedynie tylko przy bardzo małych szybkościach pełzania zbliżających się do zera, różnice mogą być duże, a więc początek logarytmiki wykresu nacisków będzie przesunięty w kierunku przeciwnym do ruchu koła i przenieg w tej części wykresu będzie łagodniejszy. W tym bowiem zakresie wszystkie krzywe na wykresach μ opadają, niekiedy bardzo gwałtownie. Przyjmując słuszność wzoru Eulera-Eytelweina $S_1 = S_2 e^{\mu\alpha}$ można wyliczyć pracę tarcia pełzania liny po niesprężystej wykładzinie odniesioną do jednostki długości podnoszenia:

$$A = \int_0^{\alpha} \int_0^{\alpha} \frac{(\mu S_2 e^{\mu\varphi})^2}{E f} d\varphi^2 = \frac{(S_1 - S_2)^2}{2 E f}$$

oraz dla wysokości podnoszenia "H", przy oznaczeniu: $Q = S_1 - S_2$ i $\lambda_H = \frac{Q H}{E f}$

$$\lambda_H = H \int_0^{\alpha} \int_0^{\alpha} \frac{(\mu S_2 e^{\mu\varphi})^2}{E f} d\varphi^2 = \frac{Q \lambda_H}{2 E f}$$

Ten wynik wskazuje, że praca tarcia pełzania zależy tylko od wielkości sprężystego wydłużenia liny λ_H , a więc od obniżenia się naczynia wydobywczego przy zakładowaniu ciężarem użytecznym "Q", a nie zależy od współczynnika tarcia μ , kąta skutecznego α ani od promienia "R". Tego wyniku można było oczekiwać na podstawie zasady zachowania energii, gdyż przyrost energii potencjalnej sprężystego wydłużenia liny po stronie zakładowanej obraca się na pokonanie oporów tarcia pełzania na skutecznej części łuku zabierania.



Legenda:

Skóra sucha

Drewno dębowe suche

Guma tekst. sucha

Kautex suchy

Skóra smarow.

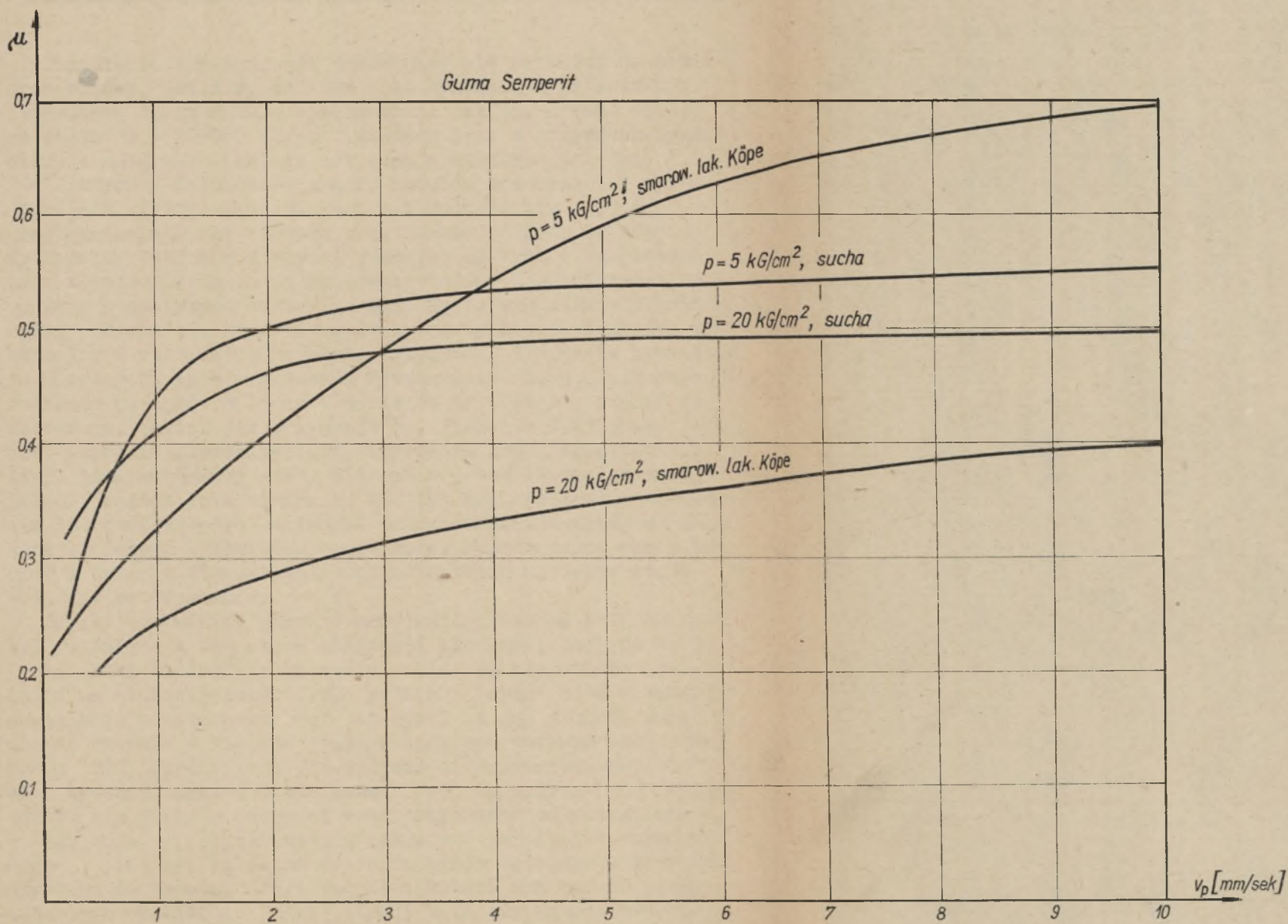
Drewno dębowe smarow.

Guma tekst. smarow.

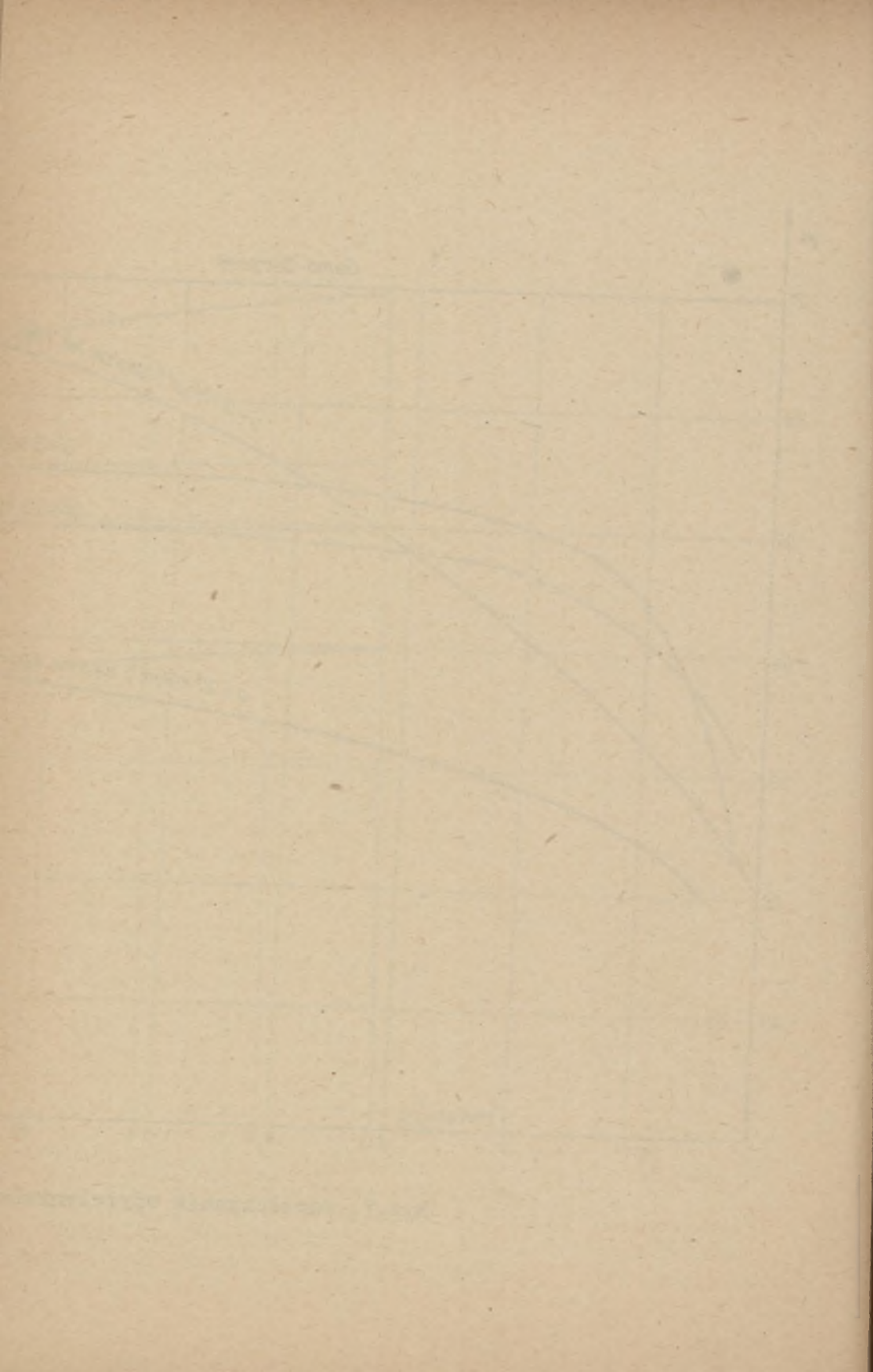
Kautex smarow.

Rys.6. Współczynnik sprężenia wg Stachurskiego

23



Rys.7. Współczynnik sprężenia wg Hajduka

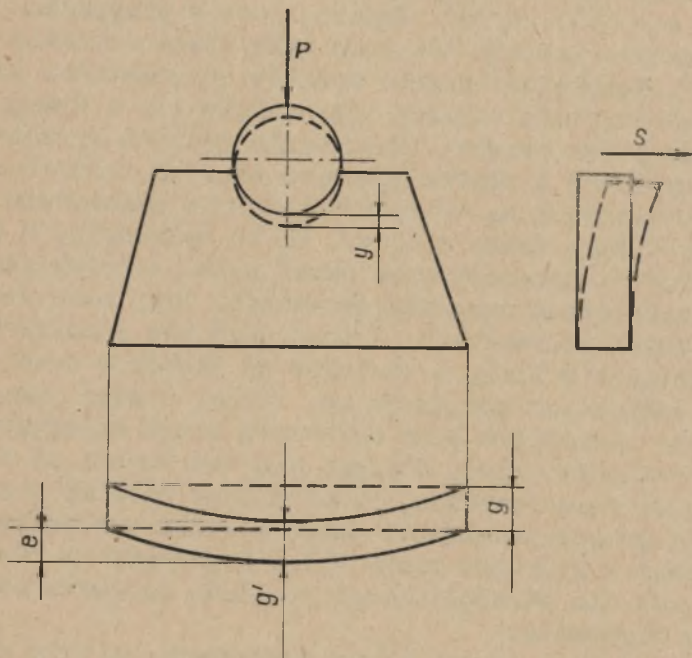


3. Wpływ sprężystości wykładziny w kierunku stycznym do obwodu

Pominięcie sprężystości wykładziny nie prowadzi do poważnych błędów, jeśli wykładzina jest wykonana z materiału o stosunkowo dużym module sprężystości jak np. drewno dębowe ze swoim $E = 100000 \text{ kg/cm}^2$. Inaczej jest w przypadku wykładziny z materiału takiego jak guma wykazująca zaledwie $E \approx 20 \text{ kg/cm}^2$. Rozpiętość granic modułów sprężystości wykładzin jest wielokrotnie większa niż modułów lin i wymaga uwzględnienia przez odrębne traktowanie różnych wykładzin. Wykładziny wykonane z płytek gumowych ciętych z odłożonych taśm transporterowych są rozpowszechnione w górnictwie francuskim, a spotykane także i u nas. Są to wykładziny o bardzo dużej podatności. Rozpatrywanie samej tylko sprężystości wykładziny z założeniem zupełnej sztywności liny może prowadzić do niewłaściwych sformułowań. Wytworzenie się początkowego rozkładu naciągów w linie i nacisków na żłobek w czasie załadowania, takich jak przyjmuje np. Pichot w swej pracy [6] jest zupełnie niemożliwe przy założeniu braku sprężystości liny. Lina musiałaby wtedy ślizgać się bez tarcia po całej jałowej części łuku opasania. Również brak podstaw w założeniu liniowej proporcjonalności odkształcenia wykładziny do kąta liczonego w kierunku ruchu koła. Wyprowadzony przez Pichot a związek dla parabolicznego rozkładu nacisków staje pod znakiem zapytania.

Płytki wykładziny gumowej przy zakładaniu na koło muszą być ściśnięte z dwu stron klinowymi klockami, tak, że spód i oba boki każdej płytki można uważać za nieruchomo utwierdzone na stalowej części koła pędnego. Płytką może doznawać przegięcia oznaczonego "e" na rys.8 i jej grubość może ulegać zmianie w miejscu styku z liną pod wpływem siły obwodowej "S", oprócz tego pod wpływem siły promieniowej "P" może wystąpić zgniot o wielkości "y". Im niższe "E" wykładziny, tym większe wartości mogą przybierać odkształcenia e, g - g', oraz y. Płytki bywają zakładane partiami w ramkach, mogą też być założone ze ściśnięciem wstępnym w kierunku stycznym do obwodu. Jeśli tego ściśnięcia nie ma, to przy spokojnym obciążeniu jednej strony koła trzymanego nieruchomo hamulcem, wytworzy się stan pokazany na rys.9. Na skutecznej części łuku występują odkształcenia liny i przesunięcia jej przekrojów oraz tarcie równoważące obciążenie liny. Na tej samej części łuku odchylą się i doznają zgniotu płytki wykładziny. Odchylenie jest największe w punkcie A, w którym

przesunięcia liny jest największe i maleje do zera w punkcie B. Odchyla się również płytki poniżej punktu A. Ponieważ odkształcenia są nieduże, można, przyjmując, że zgnioty $g - g'$ oraz przegięcia e są proporcjonalne do przenoszonych sił.

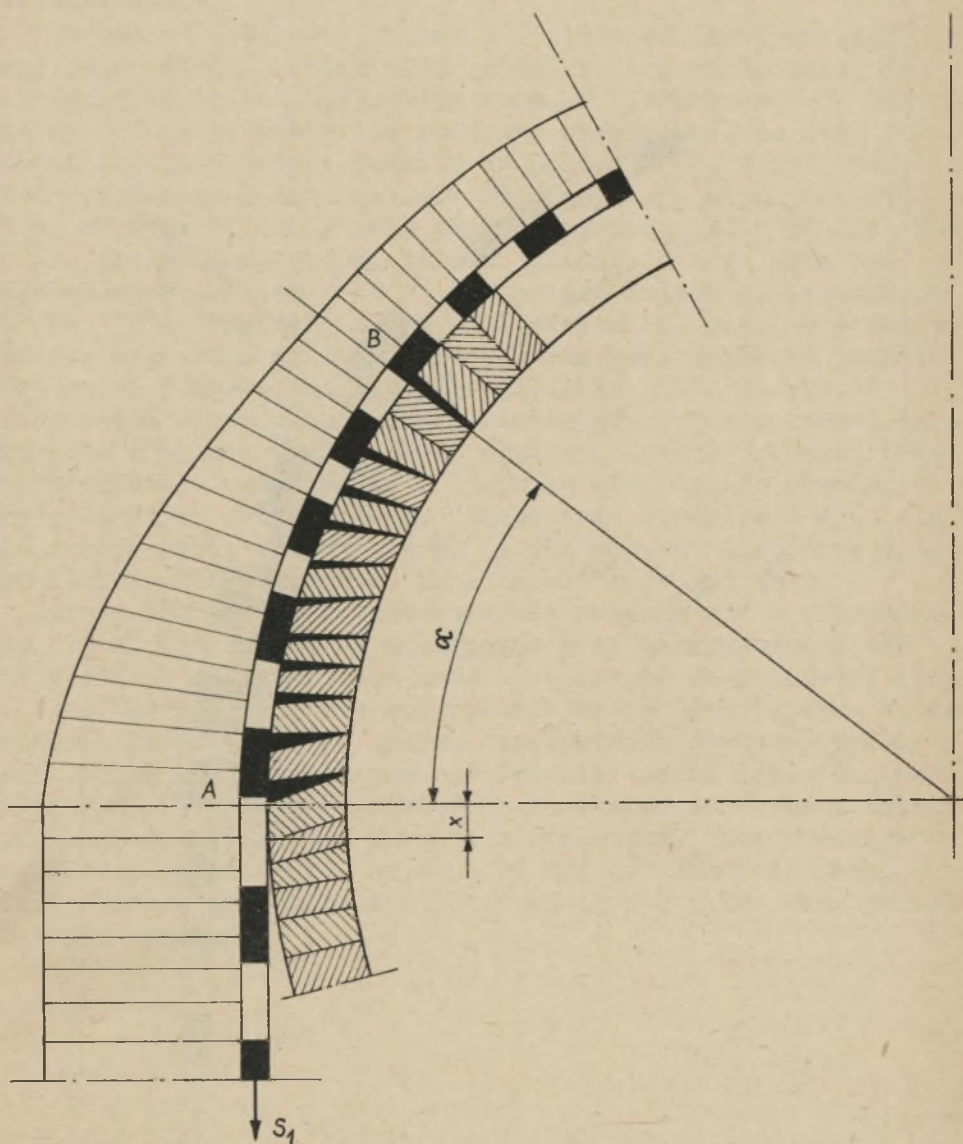


8. Odkształcenia płytki wykładziny

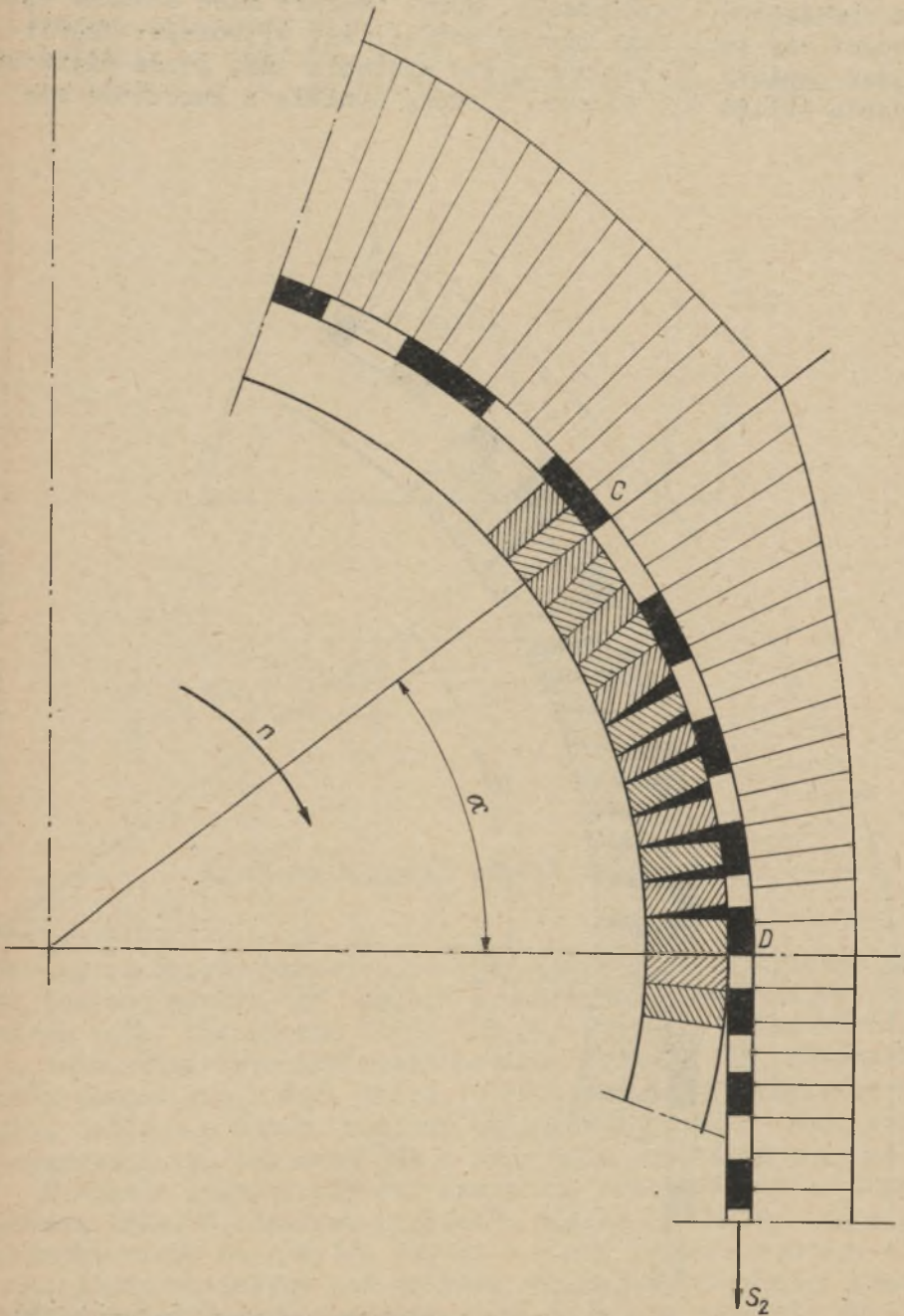
Prosty rachunek wykazuje, że siły działające na kolejne płytki poniżej punktu "A" maleją z postępem geometrycznym, a zatem tylko nieznaczna ilość tych płytek dozna odkształceń. Na łuku skutecznym przyrosty naciągu w linii dS równoważą siła tarcia $\mu p R d\varphi$, która to siła powoduje odchylenia płytek. Jeśli $\mu = \text{const.}$ rozkład naciągów i nacisków musi być logarytmiczny, tak samo jak w przypadku omówionym poprzednio.

W czasie podnoszenia łuk skuteczny przenosi się na drugą stronę koła. W idealnym przypadku mógłby wytworzyć się stan przedstawiony na rys.10. Płytki w miarę zmniejszającego się obciążenia musiałyby pod wpływem własnej sprężystości przesunąć się w kierunku przeciwnym do kierunku pełzania kurczącej się liny. W takim idealnym przypadku nie byłoby żadnego efektu sprężystości wykładziny na wielkość pełzania, rozkład

nacisków byłby ściśle taki jak omówiono poprzednio z pominięciem sprężystości wykładziny. Można wszakże mieć słuszne wątpliwości czy taki stan rzeczy potrafi się wytworzyć. Najsilniejsze zgnioty płytek musiałyby wystąpić tam, gdzie szybkość pełzania zbliża się do zera i ruchy wynikłe z kurczenia się



Rys.9. Odkształcenia liny i wykładziny przy załadowaniu

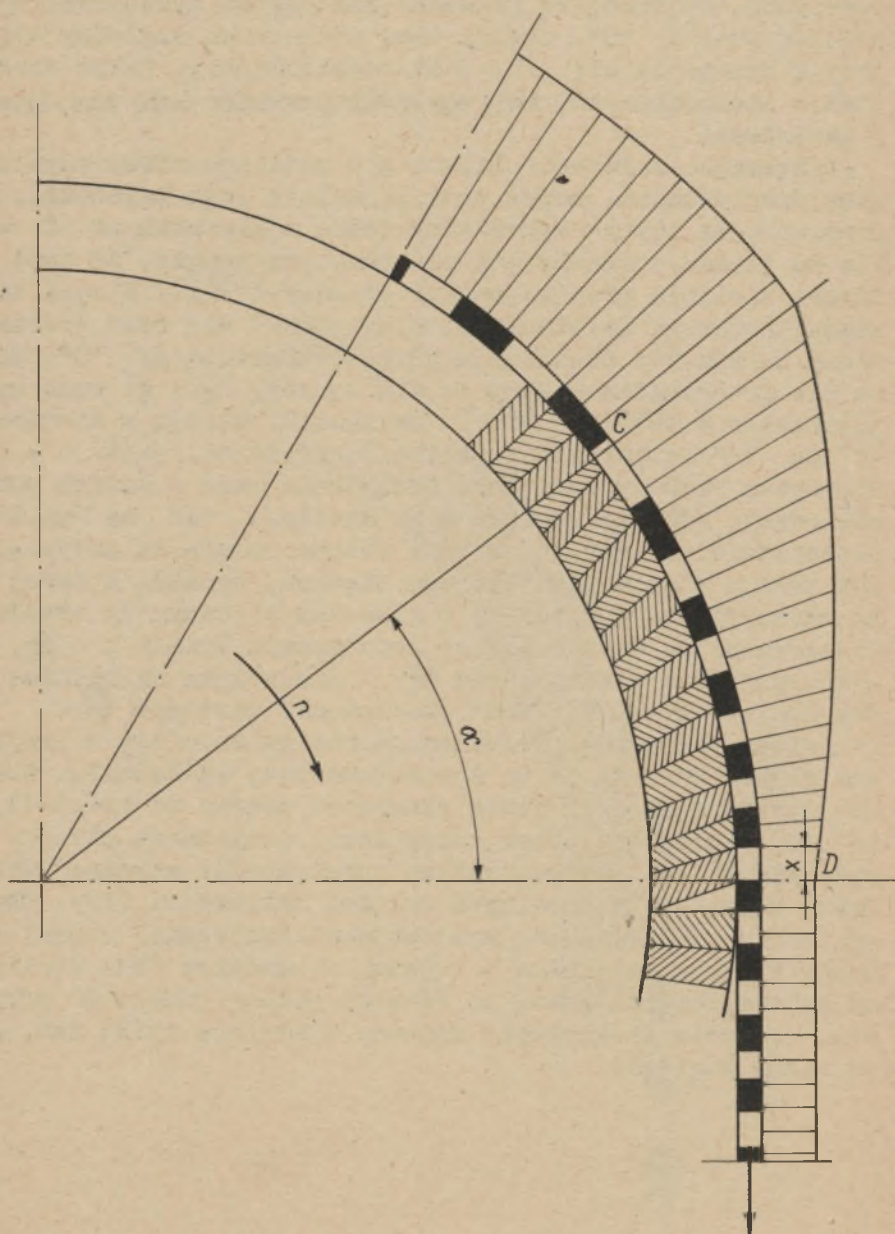


Rys.10. Przesunięcia i zgnioły płytek w czasie podnoszenia bez pełzania wykładziny

liny są najmniejsze. Przesuwanie się płytek do punktu "D" byłoby utrudnione w pewnym stopniu także i przez histerezę sprężystą. Najmniejsze przesunięcia płytek występowałyby w pobliżu punktu "D", a więc tam, gdzie ruch względny wynikający z kurczenia się liny jest najsilniejszy. Takie przedstawienie zachowania się **liny wykładziny budziło dużo wątpliwości i zastrzeżeń.**

Odrzucając założenie Pichot'a o poślizgu niesprężystej liny jako całości, można przyjąć dalsze założenie, że przesunięcia płytek wykładziny rosną w kierunku od C do D. Nie ma jednak potrzeby ani podstawy przyjmować, że jest to wzrost liniźnie proporcjonalny do kąta $\alpha - \varphi$. W myśl tak zmodyfikowanego założenia może wytworzyć się stan przedstawiony na rys.11. Odchylenia płytek wzrastają od "C" do "D" co nie przeszkadza w tym, że ich zgnioty $g - g'$ mogą być największe w pobliżu "C" i że naciski maleją w kierunku od "C" do "D" ewentualnie według logarytmiki, jeśli $\mu = \text{const}$. Sprężysta reakcja zgnioty i odchylenia musi w każdym punkcie równoważyć różnicę naciągu dS . Wielkość "x" na rys.11 przedstawia niezgodność między ruchem punktu na sztywnej części koła a ruchem podnoszonego ciężaru, wynikłą z samej tylko sprężystości wykładziny w kierunku stycznym do obwodu. Ta niezgodność na drodze całego podnoszenia wynosi $x = \frac{H}{R\alpha}$, ale nie sumuje się z wielkością $\frac{H_0}{EF}$ i nie wpływa na różnicę dróg obu klatek, która nie może przekraczać wartości $\frac{H_0}{EF}$.

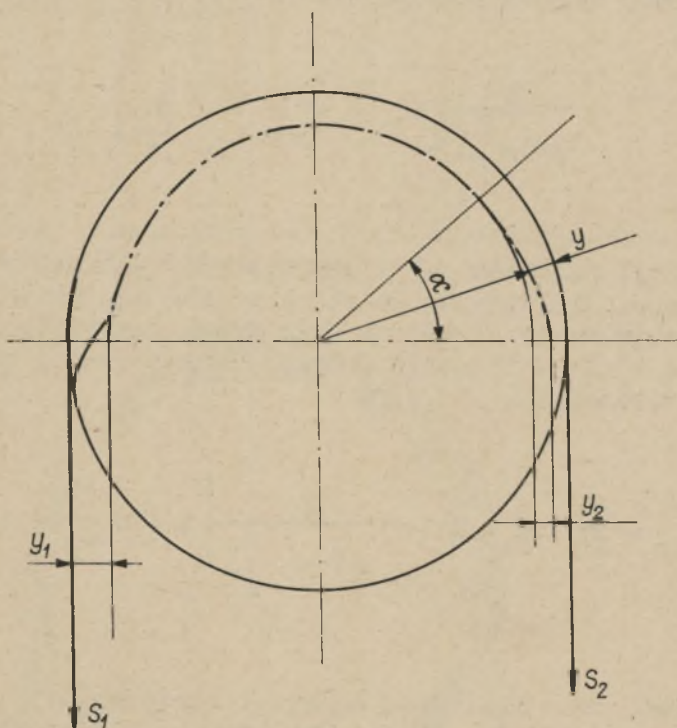
Istota powyższego rozumowania nie zmienia się w przypadku, gdy płytki wykładziny są sprasowane przy zakładaniu. Wtedy nie wystąpią miejsca puste oznaczone czarno na rys.9-11, które będą wypełnione przez rozprężenie sąsiednich płytek. W tym sposobie przedstawienia wpływu sprężystości stycznej wykładziny unika się nierealnych założeń sztywności liny. Oba pełzania liny i wykładziny występują na skutecznej części łuku. Unika się zatem założeń o ruchach wykładziny "bez poślizgu" na jałowej części łuku, co również byłoby trudne do przyjęcia, a tarcie przenoszące momenty występuje tylko tam, gdzie są ruchy względne.



Rys.11. Pełzanie styczne wykładziny

4. Pełzanie wskutek sprężystości wykładziny w kierunku promieniowym

Pod wpływem nacisku promieniowego "P" wykładzina doznaje zgniotu "y" rys.8. Ten zgniot jest bardziej zbadany niż odkształcenia styczne. Według badań Stachurskiego dla wykładzin "miękkich" $y = \frac{S}{cR}$, gdzie $c = 190 \div 300 \text{ kg/cm}$, co pokrywa się z danymi źródeł francuskich i niemieckich. Zgniot promieniowy rozkłada się na obwodzie żłobka odpowiednio do nacisków, rys.12. Zwiększenie promienia na łuku α w stosunku



Rys.12. Zgnioty promieniowe na obwodzie żłobka

do promienia na łuku $\pi - \alpha$ daje efekt pełzania, skierowanego tak samo jak poprzednie tj. opóźniającego opadanie klatki w stosunku do ruchu koła.

W następstwie zmiany promienia długość obwodu na łuku α wzrasta o wielkość:

$$\int_0^{\alpha} \left(\frac{S_1}{cR} - \frac{S_2 \cdot e^{\mu\varphi}}{cR} \right) d\varphi = \frac{\alpha}{cR \ln \frac{S_1}{S_2}} \left[S_1 \left(\ln \frac{S_1}{S_2} - 1 \right) + S_2 \right]$$

a. więc wprost proporcjonalnie do α .

Dla całego podnoszenia niezgodność między ruchem punktu na sztywnej części koła, a ruchem klatki wynikała ze sprężystości promieniowej wykładziny wyniesie:

$$\frac{H}{cR^2 \ln \frac{S_1}{S_2}} \left[S_1 \left(\frac{S_1}{S_2} - 1 \right) - S_2 \right]$$

To peźzanie, podobnie jak i sprężystość wykładziny w kierunku stycznym, nie wpłynie na różnicę dróg obu klatek.

Łączne peźzanie określone jako droga względnego ruchu punktu na linie w stosunku do punktu na sztywnej części obwodu koła wyniesie:

$$\Delta_{lk} = \frac{QH}{Ef} + \frac{H}{R} \cdot \frac{x}{\alpha} + \frac{H}{cR^2 \ln \frac{S_1}{S_2}} \left[S_1 \left(\ln \frac{S_1}{S_2} - 1 \right) + S_2 \right]$$

Stąd widać, że o ile znane są moduł sprężystości "E" i stała sprężystości promieniowej wykładziny "c" możliwym jest także znalezienie stosunku $\frac{x}{\alpha}$ przez porównanie drogi punktu na sztywnej części koła z drogą opuszczanej klatki, oczywiście pod założeniem, że nie występują inne poślizgi prócz omawianego tu peźzania.

Praca tarcia miarodajna dla zużycia wykładziny, zależy od ruchów względnych między liną a wykładziną. Te ruchy nie pokrywają się z ruchami liny względem sztywnej części koła gdyż odkształcenia wskutek sprężystości stycznej wykładziny

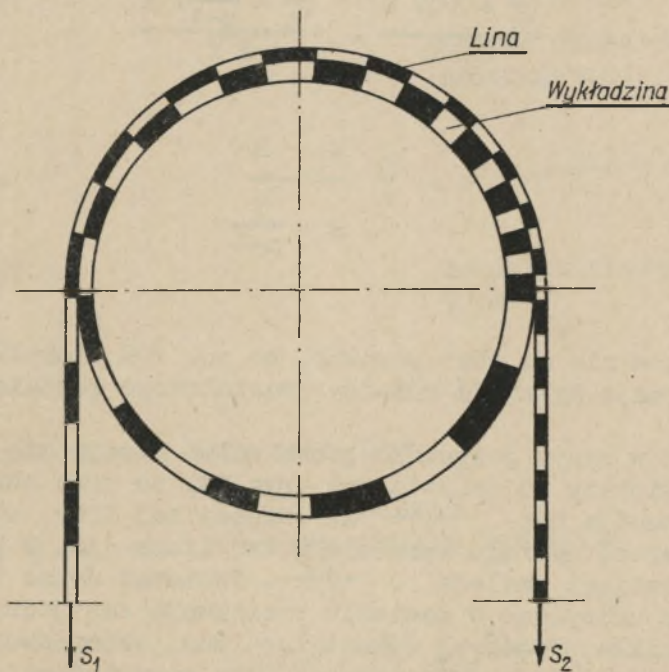
zmniejszając przesunięcia względne między liną, a wykładziną, a natomiast odkształcenia promieniowe zwiększają je. Wypadkowe pełzanie liny po wykładzinie wyniesie:

$$\Delta_{lw} = \frac{QH}{Ef} - \frac{H}{R} \cdot \frac{x}{c} + \frac{H}{cR^2 \ln \frac{s_1}{s_2}} \left[s_1 \left(\ln \frac{s_1}{s_2} - 1 \right) + s_2 \right]$$

Teoretycznie możliwym jest nawet wyeliminowanie ruchów między liną a wykładziną, jeśli

$$\frac{x}{Rc} = \frac{Q}{Ef} \quad \text{oraz} \quad c \cdot R^2 \approx \infty$$

Taki stan rzeczy przedstawia rys.13. W tym przypadku energia otrzymana z pracy sił ciężkości przy załadowaniu równa



Rys.13. Lina i wykładzina pracujące bez wzajemnych przesunięć

$\frac{Q^2 H}{2 E f}$ nie przechodziłaby w końcu w pracę tarcia liny po wykładzinie, ale zużyłaby się przez stłumienie ruchów wykładziny w nieopasanej części koła, wynikłych z energii sprężystego odkształcenia.

5. Wpływ sprężystości liny i wykładziny na wyrównanie naciągów

Sprężystość liny i wykładziny przyczyniają się do wyrównania naciągów w układach wielolinowych. Jeśli w układzie n -linowym liny nie są jednakowe w swych właściwościach, lecz zachodzą różnice w module "E", który dla jednej liny wynosi E_1 wtedy po załadowaniu ciężarem "Q" na głębokości "H", z równości przesunięć dolnych końców lin w zawiesiu wynika:

$$\frac{\left(\frac{Q}{n} + \Delta Q\right) H}{E_1 f} = \frac{\left(\frac{Q}{n} - \frac{\Delta Q}{n-1}\right) H}{E f}$$

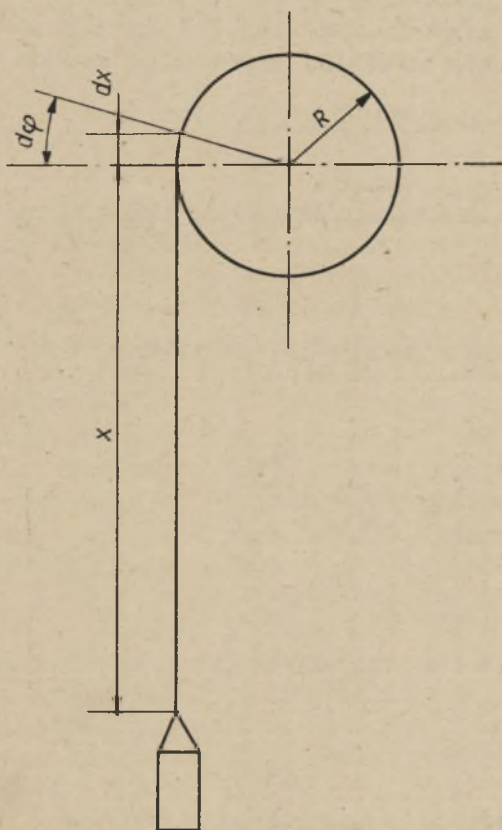
$$\Delta Q = \frac{Q}{n} \frac{E_1 - E}{E + \frac{E_1}{n-1}}$$

Te różnice nie są zbyt poważne, bo np. 10% odchyłka w wartości E daje tylko 7% różnicy prawidłowego rozdziału obciążenia.

Jeśli w innym przypadku jedna z lin nawija się na żłobek o ΔR większy od pozostałych, rys.14, to przy obrocie koła o $d\varphi$ nawija się $\frac{R + \Delta R}{R} dx$ więcej tej liny, niż pozostałych. Wzrost naciągu wyniesie w tej linie dS , w pozostałych linach naciągi zmniejszą się o $\frac{dS}{n-1}$. Ponieważ dolne końce wszystkich lin uchwycone w zawiesiu przesuwają się jednakowo, różnice wynikłe z różnych odkształceń musi skompensować peźzanie. Nawija się $+\frac{x dS}{E f}$ więcej liny przeciążonej, oraz

- $\frac{x dS}{Ef}$ mniej lin niedociążonych. Warunek równości przesunięć końców lin w zawiesiu wymaga:

$$\frac{R + \Delta R}{R} dx = \frac{x dS}{Ef} = dx + \frac{x dS}{(n-1)Ef}$$



przy podniesieniu na wysokość H , w górnym odcinku liny o długości "1" powstanie różnica napięcia ΔS :

$$\Delta S = \frac{(n-1)Ef\Delta R}{nR} \int_1^{H+1} \frac{dx}{x} = \frac{(n-1)Ef\Delta R}{nR} \ln \frac{H+1}{1}$$

Wzrost naprężenia w linie przeciążonej:

$$\Delta\sigma_+ = +\frac{n-1}{n} E \frac{\Delta R}{R} \ln \frac{H+1}{1}$$

Spadek naprężeń w pozostałych:

$$\Delta\sigma_- = -\frac{1}{n} E \frac{\Delta R}{R}$$

Rys.14. Nawijanie liny na żłobek

i różnica naprężeń z końcem wyciągu wyniesie:

$$\Delta\sigma = E \frac{\Delta R}{R} \ln \frac{H+1}{1}$$

Te różnice mogą być poważne, zwłaszcza przy dużych H , dlatego też przewiduje się urządzenia do egalizowania żłobków kół wielolinowych, a racjonalna konstrukcja ich winna zapewnić równość ugięć sprężystych płaszcza w poszczególnych żłobkach.

Sprężystość promieniowa wykładziny przyczynia się znacznie do wyrównania naciągów. Jeśli lina przeciążona podlega naciągowi "S", to pozostałe przenoszą $\frac{q-s}{n-1}$, Posługując się poprzednio już wprowadzoną stałą sprężystości promieniowej, otrzymuje się teraz warunek równości przesunięć końców w zawiesiu w postaci:

$$\frac{R + \Delta R - \frac{S}{cR}}{R} dx - \frac{x}{E f} dS = \frac{R - \frac{q-s}{(n-1)cR}}{R} ds + \frac{x}{(n+1) E f} dS$$

skąd po scałkowaniu i wstawieniu granic dla całkowitej drogi jazdy jak poprzednio:

$$\Delta S = \frac{n-1}{n} c R \Delta R \left[1 - \left(\frac{1}{H+1} \right) c R^2 \frac{Et}{f} \right]$$

$$\Delta \sigma_+ = \frac{n-1}{n} \frac{c R \Delta R}{f} \left[1 - \left(\frac{1}{H+1} \right) c R^2 \frac{Et}{f} \right]$$

$$\Delta \sigma_- = - \frac{1}{n} \frac{c R \Delta R}{f} \left[1 - \left(\frac{1}{H+1} \right) c R^2 \frac{Et}{f} \right]$$

$$\Delta \sigma = \frac{c R \Delta R}{f} \left[1 - \left(\frac{1}{H+1} \right) c R^2 \frac{Et}{f} \right] \approx \frac{c R \Delta R}{f}$$

Potęga ułamka w nawiasie ma niewielki wpływ na wynik. Decydujące są wielkości c oraz ΔR . Wykładziny miękkie, o nie-
dużej wartości stałej c są korzystne dla wyrównania obcią-

żeń. Jest to zgodne z intuicją, bo większy zgmiot w żłobku w wyniku większego naciągu przeciążonej liny sprawia, że mniej tej liny nawija się na żłobek, co daje tendencję do wyrównania przeciążenia. Podobny wpływ musi mieć także sprężystość wykładziny w kierunku stycznym, bo podatność jej pod wpływem przenoszonych obciążeń musi dawać tendencję do wyrównania. Danych liczbowych odnośnie tej sprężystości dotychczas brak.

6. Ruchy obrotowe dokoła osi liny

Liny budowy zamkniętej oraz niektóre liny skrętkowe nowszej konstrukcji, w szczególności wielowarstwowe o skrętkach owalnych, nie mają skłonności do kręcenia się. Inne liny tak współzwite o skrętkach okrągłych lub trójkątnych, jak i przeciwwzitych, wykazują tę skłonność. Pod wpływem obciążenia liny naciągiem S , na jej końcu powstaje moment $M = k \cdot S$. Współczynnik "k" ma różne wartości, zależnie od konstrukcji liny, jej średnicy i średnicy drutów. Są to momenty dość pokazne, bo reakcją ich są naciski boczne na prowadniki, które w przeciętnych warunkach, w przypadku umieszczenia prowadników na krótszym boku klatki, wynoszą po kilkaset kG na każdy trzewik prowadniczy. Dla liny 6-cio skrętkowej z 37 drutów $\phi = 2$ mm z duszą konopną współczynnik k wynosi 0,0032, jeżeli M liczone w kGcm, S w kG i lina jest przeciwwzita. Analogiczna lina współzwita ma ten współczynnik równy 0,0063. Ten moment odkrętu nie zależy od długości liny i przebiega równomiernie na całej długości, wywołując reakcje na obu utwierdzonych końcach, bez jakichkolwiek przemieszczeń na długości liny.

Ciężar własny liny zawieszony pionowo daje naciąg zmienny od przekroju do przekroju rosnący ku górze. Stąd wynikają obroty poszczególnych przekrojów. Skręt liny "ucieka" z silniej obciążonego końca na górze, ku dołowi. Skok zwinięcia staje się krótszy nad klatką, a rośnie w kierunku do koła pędnego, na żłobek nawija się lina o coraz to innym skoku. Łączny moment na górnym końcu wynosi $M = k (S + \gamma \frac{x^2}{2})$, gdzie "S" jest sumą ciężaru naczynia wydobywczego wraz z ładunkiem, γ ciężarem 1 m liny, "x" jej chwilową długością. Ten moment przenosi opór tarcia w żłobku, ponieważ wartość momentu jest duża, nieuniknionem jest pewne kręcenie się liny i poślizg obrotowy przy wejściu na koło.

Zupełnie spokojny bieg liny bez drgań wzdłużnych możliwy jest tylko w idealnych warunkach. Drgania takie zachodzą w ruchu wyciągów szybowych i powodują dalsze ruchy względne na żłobku, tak w kierunku osi liny jak i jej obroty. Zużycie wykładzin jest nieodzownym następstwem wszystkich ruchów liny względem żłobka.

Obserwacje kręcenia się liny w szybie i zmiany skoku na łuku opasania potwierdzają wnioski z rozważań teoretycznych. Jako przykład wielu obserwacji w Polsce mogą służyć dwa wyciągi o głębokości około 400 m. Obie liny były współzвите, o skrętkach trójkątnych, średnice wynosiły ϕ 54, skok wg koncesji 440 mm. Obserwowano w jednym przypadku na samym kole zmienność skoku w granicach 435 - 461 mm, w drugim 440-482 mm, a w szybie obroty od 270° do 720° w obu kierunkach. Ponadto na łuku opasania można było niekiedy obserwować zmienność skoku nieregularną, którą można tłumaczyć drganiami wzdłużnymi w linie.

7. Uwagi końcowe

Względne ruchy liny i wykładziny w stosunku do wieńca koła są nieodzownym następstwem sprężystości tych elementów i przenoszonych sił. Doświadczenia, obserwacje, pomiary na urządzeniach w ruchu, oraz dane statystyczne z około 200 urządzeń, pozwalają na wyciąganie pewnych wniosków, które dają praktyczne potwierdzenie rozważań teoretycznych, odnośnie zjawiska pełzania i zużycia wykładzin. Brak danych eksperymentalnych zaznacza się tylko odnośnie do sprężystości stycznej wykładziny w stanie zmontowanym na żłobku.

W myśl poprzednich wywodów dane te można by zdobyć przez pomiary ruchu liny względem korpusu koła, o ile znane są już dane odnośnie samej liny i sprężystości promieniowej wykładziny. Wpływ sprężystości wykładziny na jej zużycie jest istotny. Statystyka wykazuje rozbieżność trwałości wykładziny od kilku miesięcy do kilku lat, a największe zużycie wcale nie dotyczy szybów o najintensywniejszej eksploatacji, ani też przypadków o najwyższych naciskach liny na żłobek. Wykładziny o małej sprężystości jak np. samo drewno dębowe są bardzo nietrwałe. Duży wpływ ma także rodzaj liny.

Liny nieodkrętnie, budowy zamkniętej lub wielowarstwowe ze skrętek owalnych, są korzystniejsze ze względu na mniej-

sze ruchy względne. Automatyczne prowadzenie maszyny, jej bieg spokojny bez szarpnięć i drgań sprzyjają trwałości wykładzin. Sam materiał wykładzin, jego właściwości sprężyste i ścieralność mają - rzecz oczywista - znaczenie najistotniejsze.

LITERATURA

- [1] ŻUKOWSKI - Zbiór prac T. I-VI. Państwowe wyd. techn. teoret. literatury. Moskwa - Leningrad 1950.
- [2] STACHURSKI, KAWECKI - Badanie nad tarcie liny o wykładziny kół pędnych. Przegl. Górn. 1955 r.
- [3] HAJDUK - Sprzężenie cierne liny stalowej z gumową wykładziną tarczy napędowej. Referat 1958.
- [4] STACHURSKI,- Tarcie liny na kole pędnym. Praca doktorska 1960.
- [5] POPOWICZ - Rozważania nad zachowaniem się liny na kole pędnym. Archiwum Górnictwa 1955 r.
- [6] PICHOT - Problèmes particulières à la poulie Koepe. Revue de l'industrie minière 1959 №2
- [7] DENK - Podstawowe prawa tarcia 1959. Referat niepublikowany.
- [8] BAR - Sonderfragen der Mehrseilförderung. Glückauf 1959 r.
- [9] BAR - Der derzeitige Stand der Entwicklungsarbeiten für den Seilkraftausgleich bei Mehrseilforderungen. Glückauf 1959 r.

ОТНОСИТЕЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ КАНАТА И ФУТЕРОВКИ ШКИВА ТРЕНИЯ

Резюме

При фрикционном сопряжении каната с футеровкой шкива трения оба работающие элементы подвергаются упругой деформации. Поэтому возникают относительные движения каната и футеровки по окружности шкива и относительные движения каната и футеровки. Рассмотрено движение каната по футеровке, которую приняли считать жёсткой, а в последствии взяли во внимание влияние упругости футеровки. Особенно чётко проявляется это влияние тогда, когда футеровка из материала с очень низким модулем упругости. Футеровка из резиновых пластинок нарезанных из лент транспортёра является примером такого случая. К совершенно неправильным выводам ведёт рассуждение, когда принято что канат абсолютно жёсткий, которое встречается в зарубежной литературе. Теоретически возможен случай, когда нет относительного движения между канатом и футеровкой при определённом соотношении их упругостей. Указан путь, который может вести к экспериментальному определению величины упругости продольной футеровки. В заключении рассматриваются вращательные движения каната под влиянием нагрузки от собственного веса.

DIE RELATIVEN VORSCHIEBUNGEN DES SEILES UND DER FÜTTERUNG DER KOPESCHEIBE

Zusammenfassung

Die Annahme einer konstanten Reibungszahl μ unter Vernachlässigung der Fütterungselastizität führt zu der bekannten Formel $S_1 = S_2 e^{\mu \alpha}$ wobei α den wirksamen Teil des Umschlingungswinkels darstellt. Bei der bekannten Elastizitätszahl des Seiles lassen sich α aus den Messungen des Seilkrichens und μ aus der obigen Formel ableiten. Die Reibungsarbeit ist in diesem Fall unabhängig von der Reibungszahl μ und gleich der Schwerkraftarbeit während des Beladungsvorganges der Förderschale. Die Flächenpressung und die Krichgeschwindigkeit beeinflussen den Wert der Reibungszahl, die Eulersche Formel und die exponentielle Druckverteilung gelten nur als Annäherungen. Die Beschaffung und die

Elastyczność der Fütterung spielen eine wesentliche Rolle in der Übertragung der Momente. Radiale und tangentielle Verformungen der Fütterung vergrößern das Seilverhalten in der Richtung der höher belasteten Seite. Die Elastizitätszahlen der Fütterung schwanken in sehr breiten Grenzen. Die Berücksichtigung der Fütterungselastizität alleine führt zu einer parabolischen Druckverteilung und der Momentübertragung durch Haftreibung. Die direkte Summierung der durch Seilelastizität und Fütterungselastizität hervorgerufenen Kriechwerte ist irrtümlich. Mit der Ausnahme von speziellen Seilmacharten, die meisten Seile drehen sich in Betriebe um die eigene Achse unter dem Einfluss des Eigengewichtes. Die verschiedenen Drehmomente auf beiden Seiten der Köpescheibe führen zu recht komplizierten Bewegungen, welche einen gewissen Einfluss auf die Verringerung des Reibungsschlusses auf der An- und Ablaufstelle ausüben können. Auch die elastische Histerese des Fütterungsmaterials spielt eine Rolle in der Momentübertragung. Die Mitnahmekoeffizienten sind günstiger für kleinere Seildurchmesser wie für die Grösseren. Die Vorschläge der Berechnung der Mitnahmekoeffizienten als Produkte von zwei Koeffizienten in Abhängigkeit von Fütterungselastizität werden betrachtet.