

Daniel ADAMECKI, Stanisław F. ŚCIESZKA  
Politechnika Śląska, Gliwice

## OCENA STABILNOŚCI STRUGI UROBKU NA PRZENOŚNIKU TAŚMOWYM Z UWZGLĘDNIENIEM ZJAWISK DYNAMICZNYCH

**Streszczenie.** Artykuł jest kontynuacją tematyki związanej z zagadnieniami tarcia w transporcie materiałów sypkich na przenośnikach taśmowych [1, 2, 11]. W referacie omówiono oddziaływania na strugę urobku (materiału sypkiego) na przenośniku taśmowym nachylonym w sytuacji jego rozruchu lub hamowania, poruszono problem falowania materiału sypkiego na taśmie przenośnikowej oraz zaprezentowano wybrane wyniki pomiarów kąta usypu naturalnego i dynamicznego kąta usypu dla rudy miedzi.

## EVALUATION OF THE EXCAVATED MINERALS STABILITY ON BELT CONVEYORS

**Summary.** The paper presents continuation of the study on the friction between conveyor belt and loose granulated minerals [1, 2, 11]. The dynamic friction angles and theoretical coupling of stress and velocity fields within granulated minerals placed on waving belt during ranning on of the conveyor are described. Some results of the static and dynamic coefficient of friction testing for copper ore are shown.

### 1. Wprowadzenie

Transportowi materiałów sypkich (rud i paliw stałych o różnej granulacji) na przenośniku taśmowym towarzyszy ciągła zmiana konsolidacji ziarn materiału sypkiego. Pomimo znacznego wstępnego napięcia taśmy siłą  $T=(80\div 1500)$  kN, co widać na rys. 1, jej ciężar jednostkowy oraz ciężar jednostkowy transportowanego materiału sypkiego powoduje ugięcie taśmy pomiędzy zestawami krążników. Dlatego przekrój podłużny taśmy w górnej gałęzi przenośnika jest poddawany między innymi nieustannemu zginaniu. Transportowany materiał sypki faluje wraz z taśmą przenośnikową, co powoduje „ubijanie” lub „rozluźnianie”

materiału sypkiego, czyli zmiany jego konsolidacji. Do głównych parametrów opisujących zachowanie się materiału sypkiego należą: współczynnik tarcia wewnętrznego oraz współczynnik tarcia zewnętrznego, jednakże dotychczas stosowane metody pomiaru tarcia wewnątrz materiałów sypkich oraz na granicy materiału sypkiego w kontakcie na przykład z taśmą przenośnika lub ścianką zbiornika nie uwzględniają zjawisk dynamicznych zachodzących w materiale sypkim w trakcie transportu [1-4, 8-10]. Parametrem, który uwzględnia oddziaływania dynamiczne, jest dynamiczny kąt usypu. Wartości tego parametru wyznaczone są eksperymentalnie, gdyż analityczne próby wyznaczania tych wielkości sprawiają trudności. Zagadnienie stabilności strugi urobku (materiału sypkiego) na przenośniku staje się coraz bardziej aktualne, ponieważ wzrasta liczba tzw. przenośników opadających. W przenośnikach opadających występują składowe siły grawitacji, które mają kierunek zgodny z kierunkiem ruchu taśmy. Wymaga to szczególnej ostrożności przy ustalaniu maksymalnego dopuszczalnego kąta nachylenia taśmy przenośnikowej [1, 2, 12]. W niniejszym artykule podjęto próbę oceny aktualnej wiedzy teoretycznej o dynamice strugi materiału sypkiego na przenośniku taśmowym nachylonym z uwzględnieniem zjawiska wynikającego z krzywizny w przekroju podłużnym taśmy oraz przeglądu metod badań kąta usypu, w tym tzw. dynamicznego kąta usypu.

## **2. Tarcie wewnętrzne oraz teoretyczne związki pomiędzy polami naprężeń i prędkości w materiale sypkim**

Istnieją trzy sposoby podejścia do zagadnienia teoretycznego opisu zależności pomiędzy polami naprężeń i prędkości w materiałach sypkich:

- w oparciu o mechanikę ośrodków ciągłych i założenie, że uszkodzenia plastyczne w stadium początkującym inicjują ruch [10],
- w oparciu o kinematyczne (stochastyczne) podejście bazujące na założeniu, że pole prędkości jest niezależne od rozkładu naprężeń w materiałach sypkich [9],
- w oparciu o mechanikę styku w materiałach sypkich, uwzględniającą charakterystykę ciernych oddziaływań pomiędzy ziarnami ciała sypkiego [4].

Model stochastyczny [9] nie uwzględnia oddziaływań ciernych w masie ciała sypkiego w czasie jego ruchu i w celu wyznaczenia rozkładu prędkości zakłada, że ruch jest wynikiem działania sił masowych ( $\rho g$ ) i kierunek wektora prędkości w ciele sypkim otrzymujemy z funkcji prawdopodobieństwa  $P$  opisanej przez Litwiniszyna [8]:

$$\frac{\partial P}{\partial y} = B \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} \quad (1)$$

lub przez zdefiniowanie zależności między składową poziomą,  $u$ , wektora prędkości oraz gradientem poziomym składowej pionowej,  $v$ ,

$$\begin{aligned} u &= -B \frac{\partial v}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} &= B \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \end{aligned} \quad (2)$$

gdzie:  $u$  – składowa pozioma prędkości,

$v$  – składowa pionowa prędkości.

W podejściu stochastycznym pola przepływu uważa się za nieściśliwe w warunkach stałej gęstości nasypowej oraz równomiernego rozkładu luk międzywęzłowych. W konsekwencji współczynnik tarcia nie jest uwzględniany w obliczeniach pola przepływów, a rozkład prędkości oblicza się dla stanu ustalonego w pełni rozwiniętego pola przepływu.

Badania eksperymentalne z materiałami sypkimi wykazały, że podejście kinetyczne (stochastyczne) ma raczej ograniczone znaczenie praktyczne, gdyż dotyczy ciał sypkich o wymiarach ziarn ( $d \geq 1,0$  mm) o regularnym kształcie, które wykazują pomijalnie małe siły międzyziarnowe. Takie warunki oznaczają bezkohezyjne zachowanie się ciała sypkiego o minimalnych oddziaływaniach między ziarnami. Ponadto porównanie danych otrzymanych w warunkach płaskiego stanu odkształcenia w osiowosymetrycznych pojemnikach wykazało [3] istotny wpływ rozkładu prędkości na wartość mierzonych prędkości ziarn. Zaobserwowano, że im prędkość ziarn była większa, tym większa była zgodność z modelem kinematycznym [3]. To wskazuje, że dla krótkich czasów styku między ziarnami można pominąć oddziaływania cierne między nimi, co wskazuje na dyfuzyjny charakter oddziaływań między ziarnami. Takie warunki występują w płaszczyznach płaskiego stanu odkształcenia, gdzie siły bezwładności ( $\rho v^2$ ) przewyższają znacznie siły tarcia pomiędzy ziarnami ( $\tau$ ).

Badania eksperymentalne na modelach oraz w warunkach przemysłowych [3], np. w zbiornikach retencyjnych i silosach, wykazały ograniczone zastosowanie podejścia stochastycznego oraz podejścia opartego na mechanice ośrodków ciągłych. Badania te wskazują, że uwzględnienie tarcia między ziarnami ciała sypkiego jest niezbędne dla opisu pól przepływu od momentu, w którym rozpoczyna się ruch strugi w ciele sypkim. Dodatkowo dla wyjaśnienia wpływu sił międzyziarnowych na pola przepływu (rozkład chwilowych prędkości w objętości materiału sypkiego) znaczenie mają indywidualne cechy ziarn, takie

jak: wymiar, kształt, chropowatość powierzchni ziarn. Podejście oparte na mechanice styku pozwala na uwzględnienie własności pojedynczych ziarn oraz własności opisujących ich konsolidację, np. rozkładu luk międzywęzłowych. Uważa się, że łączne rozpatrywanie własności ciernych w styku między ziarnami oraz objętościowych relacji pomiędzy lukami i naprężeniem scalającym powinno pozwolić na opis zależności pomiędzy polami naprężeń i prędkości przepływu w materiałach sypkich [3, 4].

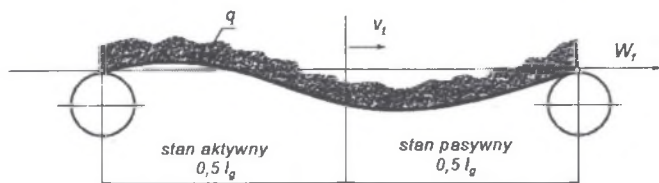
Modelowanie dynamiczne aglomeracji ziarn uwzględniające występowanie sił między ziarnami wykorzystane zostało do symulacji komputerowej przepływu dwuwymiarowego [5,6]. W celu minimalizacji czasu obliczeniowego obliczenia zostały wykonane dla przepływu tarcz o jednakowych wymiarach. W modelu uwzględniono ruch postępowy i obrotowy ziarn (tarcz), a niesprężystość włączono do obliczeń przez zastosowanie współczynnika restytucji. Zauważono, że ziarna w wyniku kolizji nie ulegają deformacji. Nawet dla tak uproszczonych modeli dwuwymiarowych symulacja komputerowa okazała się przydatnym narzędziem dla konstruktorów projektujących układy transportu dla materiałów sypkich. Dotychczasowe zastosowanie symulacji komputerowej w procesie projektowania silosów i zsuwni dla materiałów drobnoziarnistych wskazują, że można będzie tę technikę obliczeniową wykorzystać do obliczeń stabilności strugi materiału sypkiego na przenośnikach taśmowych nachylonych w sytuacjach ich hamowania i rozruchu. Obecnie symulacje komputerowe badające zachowanie się materiałów sypkich prowadzi się z wykorzystaniem metody elementów dyskretnych (DEM – discrete element method). W chwili obecnej większość programów wykorzystujących DEM znajduje się w fazie testów i jest stosowana głównie w instytutach badawczych [5,6].

W Instytucie Mechanizacji Górnictwa Politechniki Śląskiej również są podejmowane próby zbudowania modelu numerycznego umożliwiającego symulowanie zarówno transportu materiału sypkiego na opadającym przenośniku taśmowym, jak i innych zjawisk związanych z transportem materiałów sypkich.

### **3. Falowanie materiału sypkiego na taśmie przenośnikowej**

W trakcie transportu na przenośniku taśmowym materiał sypki poddawany jest „falowaniu”. Według pracy [7] można wydzielić dwie strefy ruchu załadowanej taśmy (rys.1). Odcinek pomiędzy zestawami krążnikowymi dzieli się na: strefę stanu aktywnego, gdzie

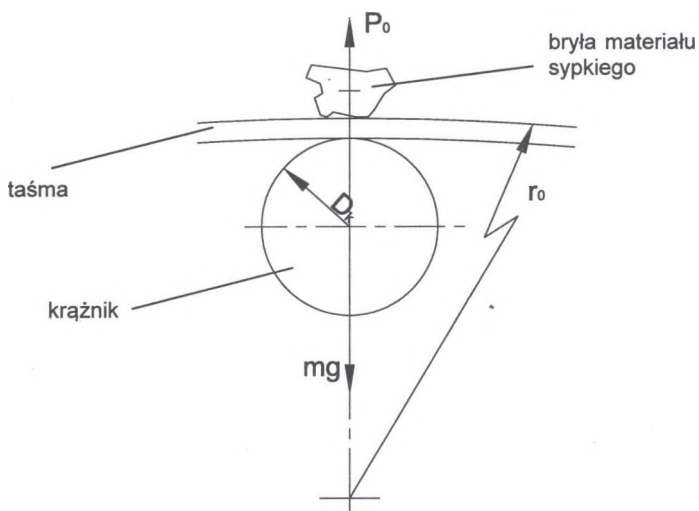
taśma wymusza odkształcenia strugi materiału sypkiego, oraz strefę stanu pasywnego, w której materiał sypki działa na taśmę.



Rys. 1. Falowanie materiału sypkiego na taśmie przenośnikowej [7]

Fig. 1. Excavated mineral waving on the belt conveyor [7]

Podczas przejścia taśmy nad zestawem krążników dochodzi do tzw. „odciążenia” materiału sypkiego spowodowanego siłą odśrodkową, natomiast między zestawami krążnikowymi następuje zjawisko „dociążenia”. W trakcie „odciążenia” na przenośniku poziomym siła odśrodkowa  $P_0$  jest skierowana prostopadle do krzywizny taśmy, czyli przeciwnie do składowej normalnej siły ciężkości  $mg$  bryły materiału sypkiego w analizowanym punkcie (rys. 2).



Rys. 2. Schemat pokazujący odciążenie materiału sypkiego na przenośniku

Fig. 2. Schematic loading on runner/belt arrangement

Z zależności (3) można obliczyć procentowy udział, o ile zmniejszy się nacisk bryły materiału sypkiego na taśmę dla przenośnika nominalnie poziomego, którego wartość zależna jest od następujących parametrów:

- prędkości taśmy,
- promienia zgięcia taśmy na podporze krążnikowej.

$$U = \frac{P_0}{mg} \cdot 100\% \quad (3)$$

gdzie:  $U$  – procentowy udział zmniejszenia nacisku bryły materiału sypkiego na taśmę,

$P_0$  – siła odśrodkowa [N],

$m$  – masa bryły [kg],

$g$  – przyspieszenie ziemskie [ $m/s^2$ ].

Prędkość nominalna taśmy przenośnikowej jest uwarunkowana wydajnością przenośnika, natomiast promień zgięcia taśmy na podporze krążnikowej jest wypadkową kilku czynników, mianowicie:

- sztywności zginania taśmy przenośnikowej,
- siły napinającej taśmę przenośnikową (ma to duże znaczenie szczególnie przy nominalnych naprężeniach nieprzekraczających 5% naprężeń zrywających),
- ciężaru jednostkowego taśmy oraz materiału sypkiego.

Na stabilność strugi materiału sypkiego na przenośniku taśmowym ma wpływ sprężenie cierne wewnątrz strugi materiału oraz między strugą materiału sypkiego a okładką nośną taśmy. Analiza zjawiska sprężenia wewnętrznego i zewnętrznego strugi jest tym bardziej istotna w przypadku przenośników opadających, gdzie „odciążenie” może się przyczynić do utracenia stabilności strugi, na przykład w trakcie awaryjnego hamowania przenośnika.

Korzystając z zależności (4), można wyznaczyć promień zgięcia taśmy na podporze krążnikowej [7]:

$$r_0 = \frac{E \cdot J}{M_0} = \frac{S_0}{q \cdot \left[ \frac{p}{\operatorname{tgh} p} - 1 \right]} \quad (4)$$

gdzie:  $EJ$  – sztywność zginania symetrycznego przekroju poprzecznego taśmy [ $Nm^2$ ],

$M_0$  – moment gnący w taśmie w miejscu podparcia zestawem krążnikowym [Nm],

$S_0$  – zastępcza siła obliczeniowa [N],

$q$  – liniowe obciążenie taśmy [N/m],

$p$  – współczynnik obliczeniowy.

Dla przykładowego wyznaczenia promienia zgięcia taśmy na podporze krążnikowej przyjęto następujące założenia: taśma typu EP2000/5; odległość między zestawami krążnikowymi  $l_g=1,2$  m; kąt niecki w ciągnie górnym  $\lambda=30^\circ$ ,  $q=1800$  N/m,  $S_0=98000$  N,  $p=5,15$  i po wstawieniu do wzoru danych otrzymamy:

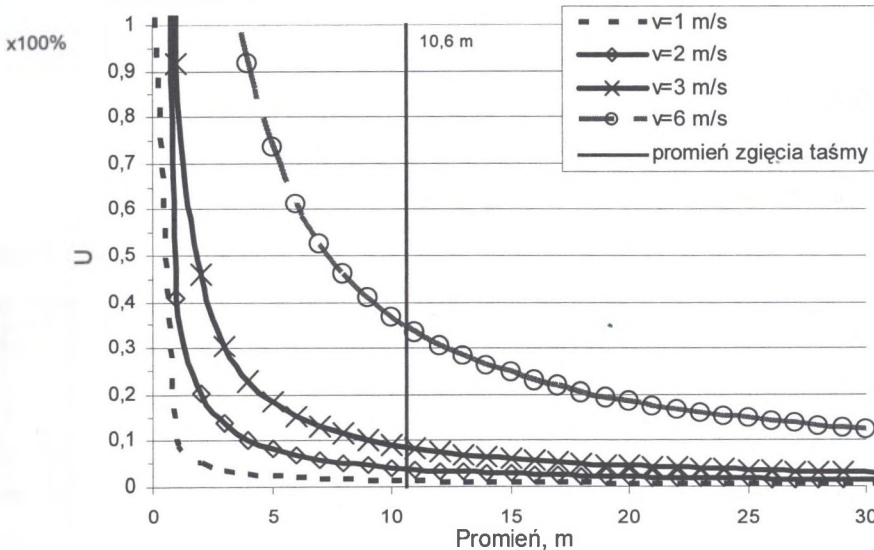
$$r_o = \frac{98000}{1800 \cdot \left[ \frac{5,15}{\operatorname{tgh} 5,5} - 1 \right]} = 10,6 \text{ m} \quad (5)$$

Na rys. 3 przedstawiono wykresy udziału siły odśrodkowej  $U$  w funkcji promienia zgięcia taśmy na podporze krążnikowej dla różnych prędkości taśmy. Pionowa linia (rys. 3) z opisem „10,6 m” przedstawia wyznaczony promień zgięcia. W tabeli 1 ujęto udział siły odśrodkowej przy różnych prędkościach taśmy dla promienia zgięcia taśmy wynoszącego 10,6 m.

Tabela 1

Procentowe wartości udziału siły odśrodkowej dla różnych prędkości taśmy

Prędkość taśmy [m/s]	U [%]
1	1
2	4
3	8
6	35

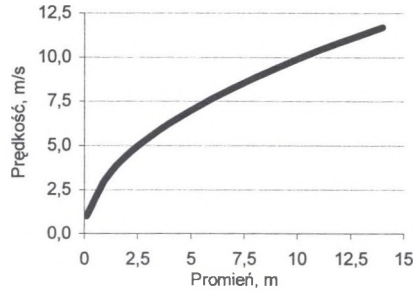


Rys. 3. Wykresy wartości udziału siły odśrodkowej w funkcji promienia zgięcia taśmy na podporze krążnikowej dla różnych prędkości taśmy przenośnikowej

Fig. 3. The centrifugal force share as the function of the deflection radius of belt on roller set for various velocities of the conveyor belt

Przy założeniu, że siła odśrodkowa zrówna się z przeciwnie skierowaną siłą ciężkości, co oznaczałoby 100% udział wg zależności (3), mogłoby dojść do oderwania się bryły materiału sypkiego lub do utraty stabilności całej strugi. Powyższe rozważanie ujęto graficznie na

rysunku 4, który przedstawia prędkość taśmy (na granicy oderwania) w funkcji przyjętego promienia zgięcia taśmy na podporze krążnikowej.



Rys. 4. Krytyczna prędkość taśmy w funkcji promienia zgięcia taśmy na podporze krążnikowej

Fig. 4. The critical velocity of belt (causing mineral lift-off) as function of the deflection radius of belt on roller set

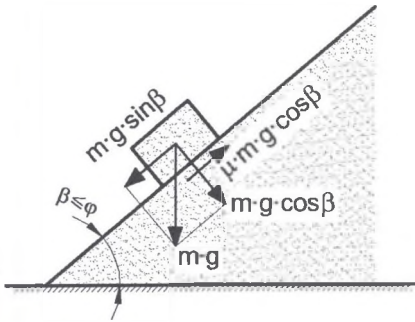
Falowanie strugi wpływa nie tylko na zmianę sprężenia ciernego materiału sypkiego względem taśmy, ale również powoduje zmianę konsolidacji (rozluźnianie lub zagęszczanie) materiału sypkiego.

## 4. Pomiary kąta usypu

### 4.1. Kąt usypu naturalnego

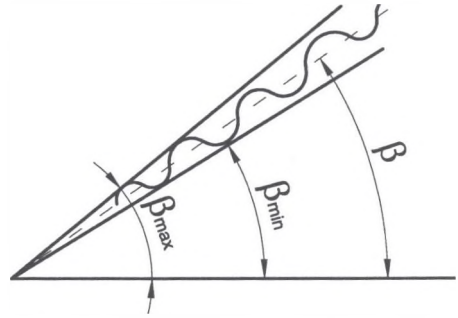
Pomiary kąta usypu naturalnego dla różnych skał miedzionośnych występujących w O/ZG Lubin wykonano metodą usypania próbek materiałów w pryzmę (rys. 7-8). Równania (6)-(8) dotyczące cząstki usytuowanej na tworzącej stożka przedstawia rysunek 5. W przypadku materiałów bezkohezyjnych kąt usypu naturalnego  $\beta$  w spoczynku jest równy kątowi tarcia wewnętrznego  $\varphi$ . Z równania dla cząstki na powierzchni pryzmy wynika, że kąt  $\beta$  w granicznym przypadku osiąga kąt tarcia wewnętrznego. Kąt usypu naturalnego jest zawarty pomiędzy minimalnym kątem usypu  $\beta_{min}$  i maksymalnym kątem stabilności pryzmy  $\beta_{max}$ . Schematycznie przedstawia to rysunek 6. Wybrane wyniki pomiarów kąta usypu naturalnego zestawiono w tabeli 2 [11].





Rys. 5. Schemat sił działających na cząstkę materiału usytuowaną na zboczu stożka [11]

Fig. 5. Schematic force system acting on a mineral particle [11]



Rys. 6. Kąt usypu naturalnego [11]

Fig. 6. The angle of natural slip [11]

$$m \cdot g \cdot \sin \beta \leq \mu \cdot m \cdot g \cdot \cos \beta \quad (6)$$

$$\operatorname{tg} \beta \leq \mu = \operatorname{tg} \varphi \quad (7)$$

$$\beta \leq \varphi \quad (8)$$

Tabela 2

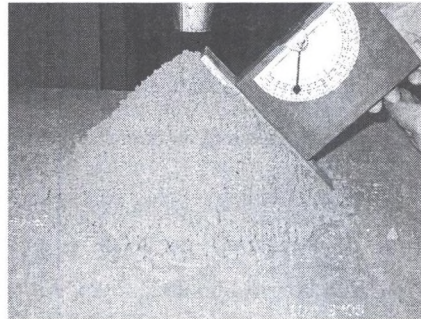
Wyniki pomiarów kąta usypu naturalnego  $\beta$ 

Typ skały	Granulacja, mm	Średni kąt $\beta$ , w stopniach
Piaskowiec	6 ÷ 10	33,3
	0,1 ÷ 6	44,5
	6 ÷ 30	38,25
	40 ÷ 53 (ostrokrawędziowy)	41,25
Łupek	40 ÷ 53 (ostrokrawędziowy)	41
Dolomit	40 ÷ 53 (ostrokrawędziowy)	51,75



Rys. 7. Stożek usypany z dolomitu miedzionośnego o granulacji 40÷53 mm znajdujący się na warstwie piaskowca miedzionośnego o granulacji 0,1÷6 mm

Fig. 7. The angle of natural slip of granulated dolomite (40÷53mm) on the layer of granulated sandstone (0,1÷6)



Rys. 8. Stożek usypany z piaskowca miedzionośnego o granulacji 0,1÷6 mm i wilgotności 7,2%

Fig. 8. The angle of natural slip of granulated sandstone (0,1÷6) and moisture content 7,2%

## 4.2. Dynamiczny kąt usypu

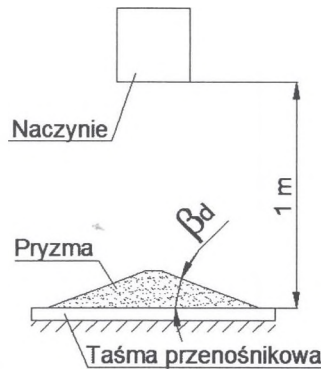
Pomiary dynamicznego kąta usypu dla rudy miedzionośnej (granulacja 6÷30 mm) przeprowadzono dwoma metodami. W metodach przyjęto uproszczone modele. W metodzie 1 (rys. 9) zamodelowano załadunek materiału sypkiego na przenośnik, natomiast w metodzie 2 zamodelowano transport materiału sypkiego na taśmie przenośnikowej.

**Metoda 1:** Na usypanej pryzmie przez opuszczanie piaskowca miedzionośnego z wysokości 1 m na nieruchomą gumową taśmę przenośnikową dokonano pomiaru dynamicznego kąta usypu (tabela 3).

Tabela 3

Pomiar dynamicznego kąta usypu  $\beta_d$ 

Lp.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\beta_d$ , stopnie	21,5	17	20	22	23	27,5	24	15,5	19	17
$\beta_{d, sr}$ , stopnie	20,7									



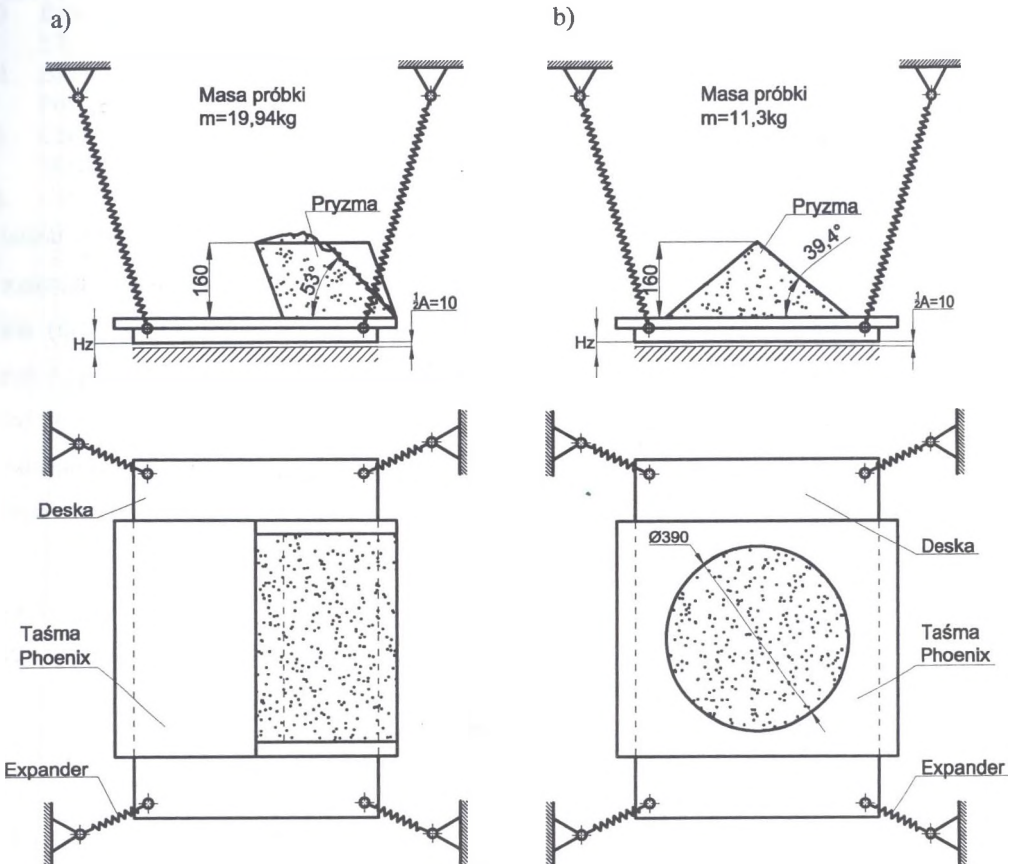
Rys. 9. Schemat sposobu pomiaru dynamicznego kąta usypu metodą sypania piaskowca miedzionośnego z wysokości 1 m [11]

Fig. 9. Testing the dynamic angle of natural slip coning from height of 1 metre [11]

**Metoda 2:** Uformowaną pryzmę (o kształcie stożka lub graniastostupa) poddano drganiom pionowym o określonej częstotliwości i amplitudzie. W tym celu zbudowano specjalne stanowisko, w którym podłoże było wyłożone gumową taśmą przenośnikową. Schemat stanowiska przedstawia rysunek 10. Stożek poddano pionowym wymuszonym drganiom o częstotliwości 1 Hz i amplitudzie  $A$  określonej 2% zwisem taśmy między zestawami krążników, zatem:  $A = 0,02 \cdot 833 = 16,7$  mm. Amplitudę zwiększono do 20 mm. Po okresie 300 s odczytano dynamiczny kąt usypu, który wynosił:  $\beta_d = 36,3^\circ$ . Zatem kąt tworzącej stożka

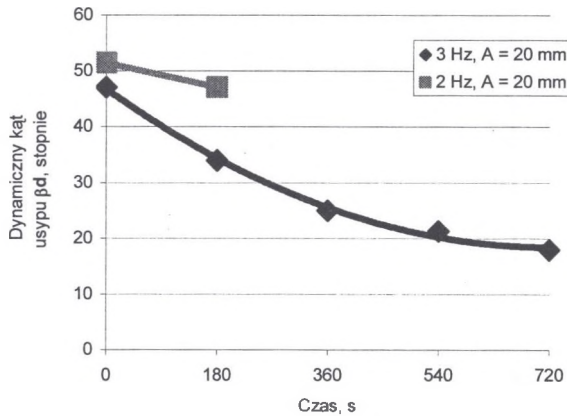
zmniejszył się o około  $3^\circ$ . Kolejnych badań tą metodą nie prowadzono z uwagi na zagęszczanie się materiału w stożku.

W dalszym etapie badań pryzma miała kształt graniastostłupa ułatwiający zsypanywanie się materiału sykiego podczas drgań z płyty (taśmy) przenośnikowej. Kształt pryzmy przedstawia rys. 10. Początkowo pryzma materiału sykiego miała masę 19,9 kg, która po cyklu pomiarów zmalała do 3,6 kg. Pierwszych kilka pomiarów przeprowadzono z częstotnością 2 Hz i z amplitudą 20 mm. Następnie zwiększono częstotność do 3 Hz (właściwa częstotność powinna odpowiadać rzeczywistym warunkom, czyli: iloraz prędkości taśmy 2,0 m/s do odległości pomiędzy zestawami krążnikowymi 0,833 m, a więc  $2 / 0,833 = 2,41$  Hz, a dla przenośników magistralnych:  $2,5 / 0,833 = 3,01$  Hz) przy zachowaniu amplitudy na poziomie 20 mm. Wyniki pomiarów przedstawiono graficznie na rysunku 11.



Rys. 10. Schemat stanowiska do badania dynamicznego kąta usypu: a) pryzma w postaci graniastostłupa, b) pryzma w postaci stożka [11]

Fig. 10. The test stand for the dynamic angle of natural slip avaluation: a) prism pile, b) cone pile [11]



Rys. 11. Wykres wartości dynamicznego kąta usypu  $\beta_d$  piaskowca miedzionośnego (granulacja  $6\pm 30$  mm) w funkcji czasu trwania pionowych drgań podłoża [11]

Fig. 11. The dynamic angle of natural slip for the granulated sandstone ( $6\pm 30$  mm) as function of vibration time [11]

## 5. Podsumowanie

- Na podstawie obliczeń tzw. „odciążenia” poprzez wyznaczenie  $U$  ( $U$  - procentowy udział zmniejszenia siły nacisku bryły materiału sypkiego na taśmę) uzyskano następujące wyniki (na podstawie zależności (5) wyznaczono promień zgięcia taśmy  $r_0=10,6$  m): dla prędkości taśmy  $v=3$  m/s otrzymano „odciążenie” około  $U=10\%$ , natomiast dla  $v=6$  m/s wartość „odciążenia” dochodzi do  $35\%$ . W celu weryfikacji teoretycznych obliczeń udziału siły odśrodkowej powodującej „odciążenie” materiału sypkiego na przenośniku taśmowym niezbędne jest wykonanie pomiaru promienia zgięcia taśmy na rzeczywistym przenośniku taśmowym.
- Zmniejszenie siły odśrodkowej podczas falowania materiału sypkiego można uzyskać przez obniżenie prędkości taśmy lub zwiększenie promienia zgięcia taśmy na podporze krążnikowej, które można kontrolować poprzez wzrost nominalnego napięcia taśmy. Zagadnienie falowania materiału sypkiego na przenośniku taśmowym ma szczególne znaczenie w przypadku przenośników opadających.
- Pomiar dynamicznego kąta usypu daje obraz zjawisk zachodzących na taśmie przenośnikowej bardziej dokładny niż pomiary kąta usypu naturalnego. Dlatego w obliczeniach należy stosować wyniki pomiarów dynamicznego kąta usypu  $\beta_d$ . I tak, na podstawie przeprowadzonych pomiarów dynamicznego kąta usypu [11] do obliczeń

przenośników taśmowych opadających transportujących urobek rudy miedzi należy przyjmować  $\beta_d = 18^\circ \div 21^\circ$ .

## LITERATURA

1. Adamecki D., Ścieszka S. F.: Ocena zmiany sprzężenia ciernego nosiwa na przenośnikach taśmowych w trakcie hamowania. II Międzynarodowa Konferencja: Bezpieczeństwo pracy urządzeń transportowych w górnictwie – diagnostyka, naprawy i remonty. Ustroń, 8-10 listopada 2006.
2. Adamecki D., Ścieszka S. F.: Rola tarcia wewnętrznego i zewnętrznego w transporcie minerałów sypkich. Konferencja Naukowa: Górnictwo Zrównoważonego Rozwoju 2006. Artykuł publikowany w 3 i 4 numerze kwartalnika Górnictwo i Geologia, Gliwice 2006.
3. Briscoe B., Adams M.: Tribology In Particulate Technology. Adam Hilger, Bristol, 1987, 57.
4. Briscoe B., Pope L., Adams M.: Interfacial friction of powders on concave counterfaces. Powder Technology 37, 1984, 169.
5. Campbell C., Brennen C.: Computer simulation of granular shear flows. Journal of Fluid Mechanics 151, 1985, 167.
6. Campbell C., Gong A.: The stress tension in a two dimensional granular shear flow. Journal of Fluid Mechanics 164, 1986, 107.
7. Gładysiewicz L.: Przenośniki taśmowe; teoria i obliczenia. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2003.
8. Litwiniuszyn J.: The model of random walk of particles in granular media. Biuletyn PAN 11, 1963, 6.
9. Nedderman R.: A kinematic model for the flow of granular materials. Powder Technology 22, 1979, 243.
10. Pariseau W.: Discontinuous velocity fields in gravity flows of granular materials through slots. Powder Technology 3, 1969, 218.
11. Sprawozdanie z pracy NB-179/RG-2/2005 (kierownik pracy: Antoniak J.), Politechnika Śląska, Instytut Mechanizacji Górnictwa, Gliwice 2005.
12. Żur T.: Specyficzne podstawy projektowania przenośników taśmowych z trasą nachyloną w dół. Zeszyty Naukowe Instytutu Górnictwa Odkrywkowego nr 1/95, Wrocław 1995, 5-17.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Stanisław Pytko