

Henryk KOSTRZEWA

BADANIA EKSPERYMENTALNE OPORU TARCIA TOCZNEGO TAŚMY PRZENOŚNIKOWEJ Z UWZGLĘDNIENIEM JEJ TEMPERATURY

Streszczenie. W artykule przedstawiono badania oporu tarcia tocznego taśmy przenośnikowej z uwzględnieniem jej temperatury. W badaniach wyznaczono zależność jednostkowego oporu tarcia tocznego taśmy przenośnikowej od: nacisku jednostkowego, średnicy krawężnika oraz temperatury, prędkości i napięcia taśmy. Wyniki badań opracowano statystycznie, wyznaczając na tej podstawie analityczną zależność jednostkowego oporu tarcia tocznego taśmy przenośnikowej od uwzględnionych w badaniach jego wielkości wpływowych.

1. WSTĘP

Teoretyczne i eksperymentalne badania naukowe są czynnikiem stymulującym i zapewniającym postęp techniczny w zakresie środków transportowych w tym także przenośników taśmowych. Badania eksperymentalne są podstawową metodą weryfikacji prac teoretycznych. Natomiast w przypadku badań dotyczących skomplikowanych zjawisk fizycznych są niekiedy jedyną metodą umożliwiającą uzyskanie informacji ilościowych dotyczących danego zjawiska, mających znaczenie praktyczne.

Wynikiem szeregu badań eksperymentalnych przeprowadzonych w zakresie przenośników taśmowych jest m.in. systematyczne doskonalenie ich metod obliczeniowych. Stosowanie dokładniejszych metod obliczeniowych umożliwia bardziej racjonalny dobór ich parametrów technicznych. Z badań eksperymentalnych dotyczących tych środków transportowych wynika także szereg wytycznych odnośnie: rozwiązań konstrukcyjnych poszczególnych zespołów i podzespołów składowych, technologii wykonania elementów składowych itd. W związku z tym badania eksperymentalne odgrywają ważną rolę w zakresie rozwoju technicznego przenośników taśmowych, odgrywających szczególną rolę w nowoczesnych kopalniach, gdzie transport jest całkowicie taśmowany.

2. CEL I ZAKRES BADAŃ

Celem badań było w pierwszym rzędzie wykonanie ustalonego cyklu pomiarów oporu tarcia tocznego taśmy przenośnikowej, które umożliwiłyby:

- weryfikację tezy, że opór tarcia tocznego taśmy przenośnikowej zależy istotnie od temperatury objętościowej taśmy zmieniającej się w zakresie 263÷303 K,
- wyznaczenie równania empirycznego, ujmującego zależność jednostkowego oporu tarcia tocznego taśmy przenośnikowej od: nacisku liniowego, średnicy krążnika oraz temperatury, prędkości i napięcia względnego taśmy, dla taśm przenośnikowych o odmiennej postaci konstrukcyjnej.

Badania oporu tarcia tocznego taśmy przenośnikowej przeprowadzono z uwzględnieniem wielkości wpływowych i ich zakresów podanych w tabelicy 1.

Tabela 1

Wielkości wpływowe i ich przyjęte zakresy zmian

Wielkość wpływowa	Zakres	Jednostka
Nacisk liniowy	1750 ÷ 5800	N/m
Średnica krążnika	100 ÷ 220	mm
Temperatura taśmy	263 ÷ 303	K
Prędkość taśmy	1,8 ÷ 5,0	m/s
Napięcie względne taśmy	1 ÷ 5	%

W tabelicy 1 nacisk liniowy to stosunek promieniowego obciążenia krążnika do długości styku liniowego krążnika i taśmy przenośnikowej. Napięcie względne wyraża udział procentowy siły rozciągającej taśmę, w odniesieniu do jej nominalnej wytrzymałości wzdłużnej na zerwanie.

Badania oporu tarcia tocznego taśmy przenośnikowej przeprowadzono na próbkach taśm typu TK420 i ST3150, które charakteryzują się odmienną postacią konstrukcyjną. Taśmy TK420 stosuje się zarówno w górnictwie odkrywkowym, jak i podziemnym, w przenośnikach taśmowych średniej i dużej mocy. Taśmy z rdzeniem z linkami stalowymi, do których należy taśma ST3150, są stosowane prawie wyłącznie w górnictwie odkrywkowym. Tak więc przyjęte do badań rodzaje taśm przenośnikowych pokrywają stosunkowo duży zakres zastosowań tego rodzaju cięgna w przenośnikach taśmowych.

Podstawowe dane dotyczące charakterystyki mechanicznej zastosowanych do badań taśm przenośnikowych podano w tabeli 2. Długość próbek taśm przenośnikowych w linii zamkniętej wynosiła 10 m.

Tabela 2

Podstawowe dane charakterystyki mechanicznej badanych taśm przENOŚnikowych

Charakterystyka taśmy		Rodzaj taśmy	
		TK420	ST3150
Nominalna wytrzymałość wzdłużna taśmy na zerwanie, kN/m		1640	3090
Grubość taśmy, mm		17	21,5
Materiał	różnienia	stylon	linki stalowe
	okładek	guma	guma
Ilość przekładek		4	-
Średnica linki, mm		-	6,0
Podziałka linek, mm		-	10
Grubość okładki, mm	bieżna	3	5
	nośna	5	10,5
Twardość, stopnie Shore'a		72	64
Ścieralność wg Shoppera, cm ³		0,181	0,159
Producent		ZGG Miecho- wice	ZPG Wolbram

3. BADANIA OPORU TARCIA TOCZNEGO TAŚMY PRZENOŚNIKOWEJ

Badania oporu tarcia tocznego taśmy przENOŚnikowej przeprowadzono za pomocą układu badawczego przedstawionego w pracy doktorskiej [2] i publikacji autora [3]. W badaniach uwzględniono takie wielkości wpływowe oporu tarcia tocznego taśmy przENOŚnikowej, jak: nacisk liniowy, średnia krętnika oraz prędkość napięcia i temperatura taśmy. Zakresy zmian powyższych czynników podano w tabeli 1.

Badania danej taśmy przENOŚnikowej rozpoczynano od temperatury 303 K, obniżając ją stopniowo do temperatury 263 K. W każdej temperaturze badań, przed rozpoczęciem pomiarów oporu tarcia tocznego, taśmy stabilizowano cieplnie przez okres 18 ks (5 godzin). Przed uruchomieniem napędu stanowiska badawczego, celem realizacji pojedynczego pomiaru oporu tarcia tocznego, włączano układ napinania taśmy. Dzięki temu taśma w czasie pomiaru tarcia tocznego posiadała praktycznie ustalone wydłużenie. Odczyt poszczególnych wartości oporów ruchu występujących w wózku pomiarowym następował po ustaleniu się wskazań mierników pomiarowych. Po dokonaniu pomiarów wy-

łączano napęd stanowiska badawczego. Czas pracy napędu stanowiska badawczego, umożliwiający realizację pojedynczego pomiaru oporu tarcia tocznego, wynosił około 20 s. Na podstawie badań wstępnych przyjęto czas postoju stanowiska badawczego równy 600 s. Tak więc stosunek czasu postoju stanowiska badawczego do jego czasu pracy wynosił 30. Należy także nadmienić, że w trakcie prowadzenia pomiarów w danej temperaturze występowały także dłuższe przerwy w pracy stanowiska badawczego. Zastosowany w badaniach oporu tarcia tocznego układ stabilizacji temperatury oraz przyjęta metodyka badań pozwoliły ustalić temperaturę taśm na zadanym jej poziomie z dokładnością ± 1 K. Pomiaru temperatury taśm prowadzono za pomocą termometru termistorowego firmy "Thermophol", którego działka elementarna wynosiła 0,5 K.

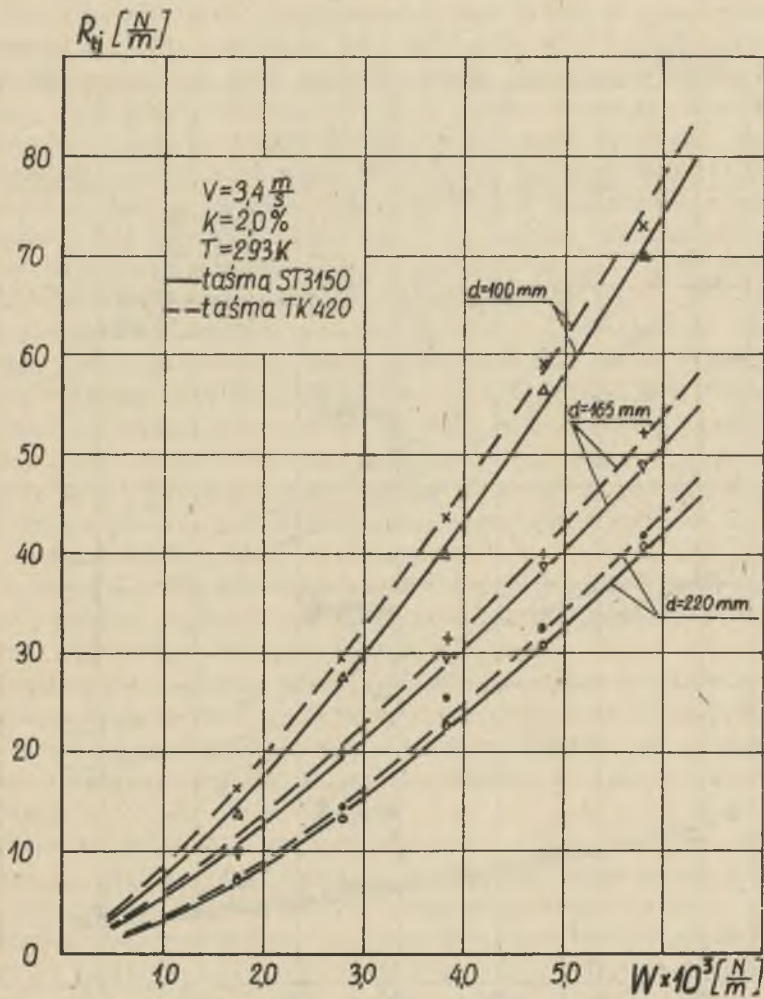
W każdej temperaturze badań wzorcowano zastosowane tensometryczne układy pomiarowe. Uzyskane wyniki wzorcowań były podstawą wyznaczenia ich charakterystyk i stałych.

4. WYNIKI BADAŃ OPORU TARCIA TOCZNEGO TAŚM PRZENOŚNIKOWEJ I ICH ANALIZA

Na podstawie uzyskanych wyników badań sporządzono wykresy przedstawiające zależność oporu tarcia tocznego od uwzględnionych w badaniach wielkości wpływowych. Przyjęcie pięciu poziomów wielkości wpływowych, przy ściśle monotonicznym charakterze otrzymanych zależności, umożliwiło przeprowadzenie graficznej aproksymacji wyników badań (wykreślenie krzywych). Na osiach rzędowych naniesiono wartości jednostkowego oporu tarcia tocznego w N/m, który wyznaczono ze stosunku wartości oporu tarcia tocznego przypadającego na krążnik do długości styku liniowego krążnika i taśmy przENOŚnikowej. Na zamieszczonych w publikacji wykresach przedstawiono część uzyskanych wyników badań.

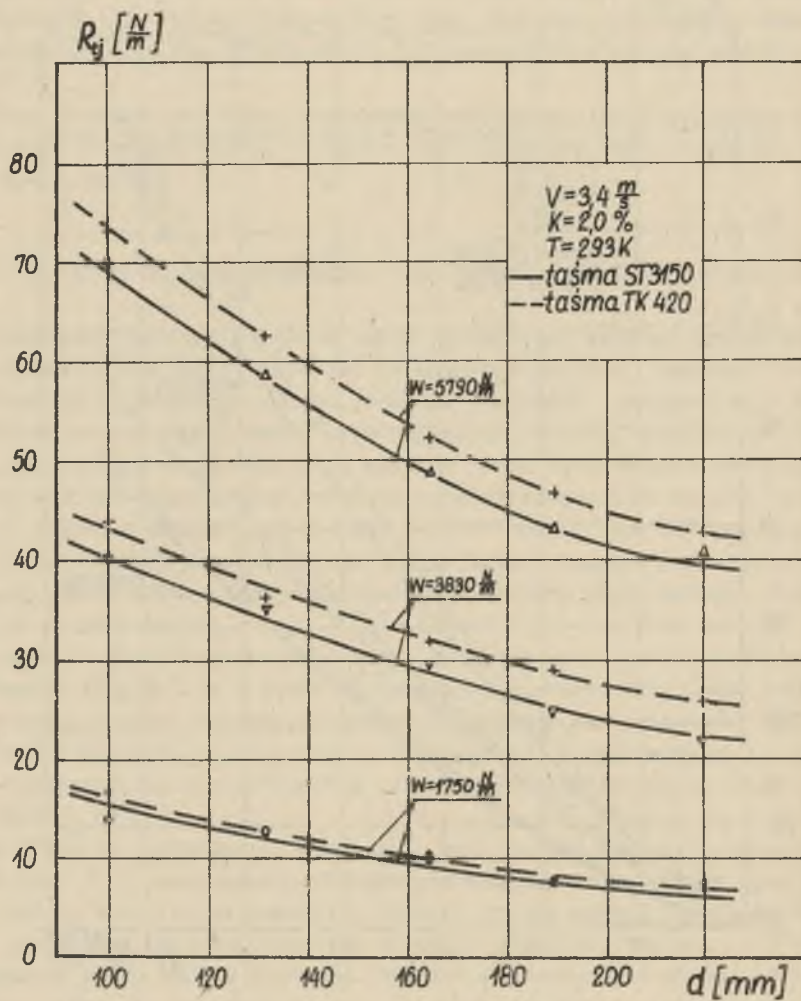
Na rysunku 1 przedstawiono zależności jednostkowego oporu tarcia tocznego badanych taśm ST3150 i TK420 od nacisku liniowego. Zależność jednostkowego oporu tarcia tocznego od nacisku liniowego ma charakter funkcji potęgowej o wykładniku większym od 1. W przeprowadzonych badaniach oporu tarcia tocznego taśmy przENOŚnikowej otrzymano wykładnik potęgi równy około 1,3 (tabela 5).

Wpływ średnicy krążnika na jednostkowy opór tarcia tocznego przedstawiono na rys. 2. Z przedstawionych wykresów wynika, że zależność tego oporu od średnicy krążnika ma charakter funkcji ściśle monotonicznie malejącej, tj. mniejszej wartości średnicy krążnika odpowiada większa wartość jednostkowego oporu tarcia tocznego. Ponadto większym wartościom nacisku liniowego w zakresie badanych średnic krążnika odpowiada większy bezwzględny przyrost jednostkowego oporu tarcia tocznego. W przeprowadzonych badaniach jednostkowego oporu tarcia tocznego taśmy przENOŚnikowej otrzymano wartość wykładnika potęgi około - 0,7 (tabela 5).



Rys. 1. Zależność jednostkowego oporu tarcia toczonego od nacisku liniowego dla:

$v = 3,4 \text{ m/s}$; $K = 2,0\%$; $T = 293 \text{ K}$; $d = 100; 165; 220 \text{ mm}$



Rys. 2. Zależność jednostkowego oporu tarcia toczonego od średnicy krążnika dla:

$v = 3,4 \text{ m/s}$; $K = 2,0\%$; $T = 293 \text{ K}$; $W = 1750$; 3830 ; 5790 N/m

Zależność oporu tarcia tocznego od temperatury taśmy przedstawiono na rys. 3. Z wykresów wynika, że wpływ temperatury taśmy na jednostkowy opór tarcia tocznego, podobnie jak w przypadku wpływu średnicy krążnika, ma także charakter funkcji monotonicznie malejącej. Wynika z tego, że w miarę obniżania temperatury taśmy następuje wzrost jednostkowego oporu tarcia tocznego. Uzyskany charakter zależności jest wynikiem wzrostu strat histerezowych, występujących przy toczeniu krążnika po taśmie przenośnikowej w miarę obniżania jej temperatury. Wniosek ten wynika z prac teoretycznych, dotyczących fizykalnych przyczyn tarcia tocznego przy toczeniu sztywnego walca po materiale lepkosprężystym [2], [3]. W przypadku badanych taśm przenośnikowych, przy obniżeniu temperatury taśmy w badanym zakresie, większym wartościom nacisku liniowego (rys. 3) odpowiada większy bezwzględnie przyrost jednostkowego oporu tarcia tocznego. Na podstawie uzyskanych wyników badań można stwierdzić, że wpływ temperatury na jednostkowy opór tarcia tocznego taśmy ST3150 jest większy niż w przypadku taśmy TK420. Jest to wynikiem ich odmiennej postaci konstrukcyjnej, własności lepkosprężystych zastosowanych materiałów i cech geometrycznych poszczególnych elementów ich budowy strukturalnej.

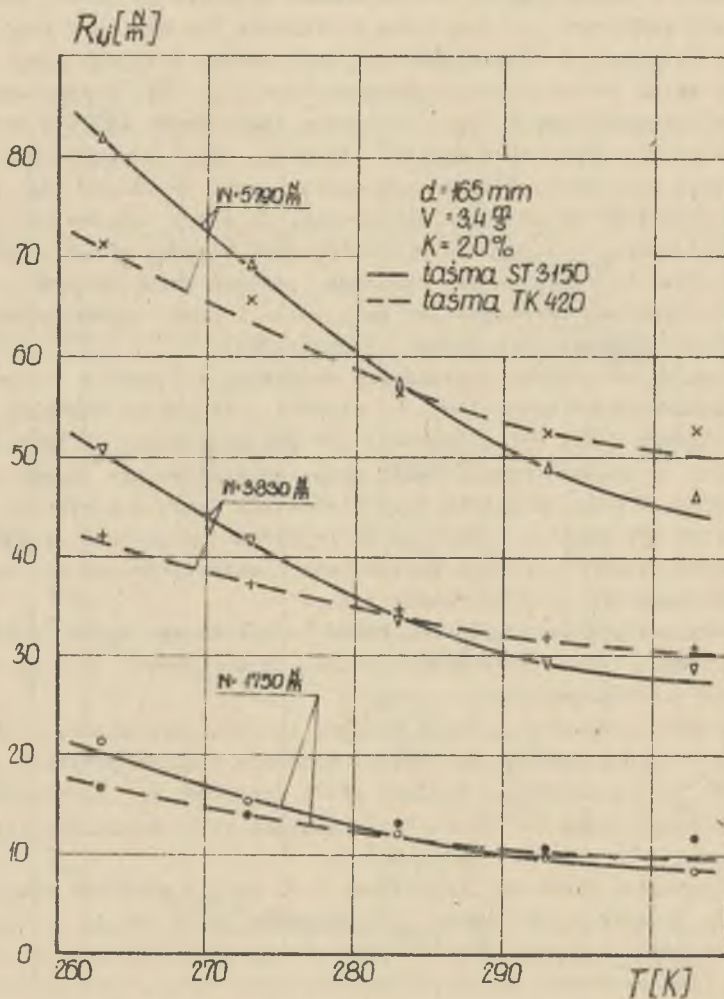
W przypadku stosowania przenośnika taśmowego w szerokim zakresie temperatur otoczenia wskazane jest, by wpływ tej wielkości fizykalnej na opór tarcia tocznego taśmy przenośnikowej był jak najmniejszy. Pozwoliłoby to na bardziej optymalne wykorzystanie mocy zainstalowanego napędu przenośnika taśmowego. W celu ustalenia charakterystyki taśmy o powyższej właściwości należy przeprowadzić badania nad wpływem jej postaci konstrukcyjnej, cech geometrycznych i rodzaju zastosowanych materiałów, na zależność oporów tarcia tocznego od temperatury taśmy.

Na rysunku 4 przedstawiono zależność jednostkowego oporu tarcia tocznego od prędkości taśmy. Z wykresów wynika, że zależność ta ma charakter funkcji ściśle monotonicznie rosnącej.

Zwiększeniu prędkości taśmy w badanym zakresie odpowiada, w przypadku większych wartości nacisku liniowego, wyraźnie większy przyrost jednostkowego oporu tarcia tocznego. Ogólnie wpływ prędkości na jednostkowy opór tarcia tocznego taśmy ST3150 jest nieznacznie większy niż w przypadku taśmy TK420.

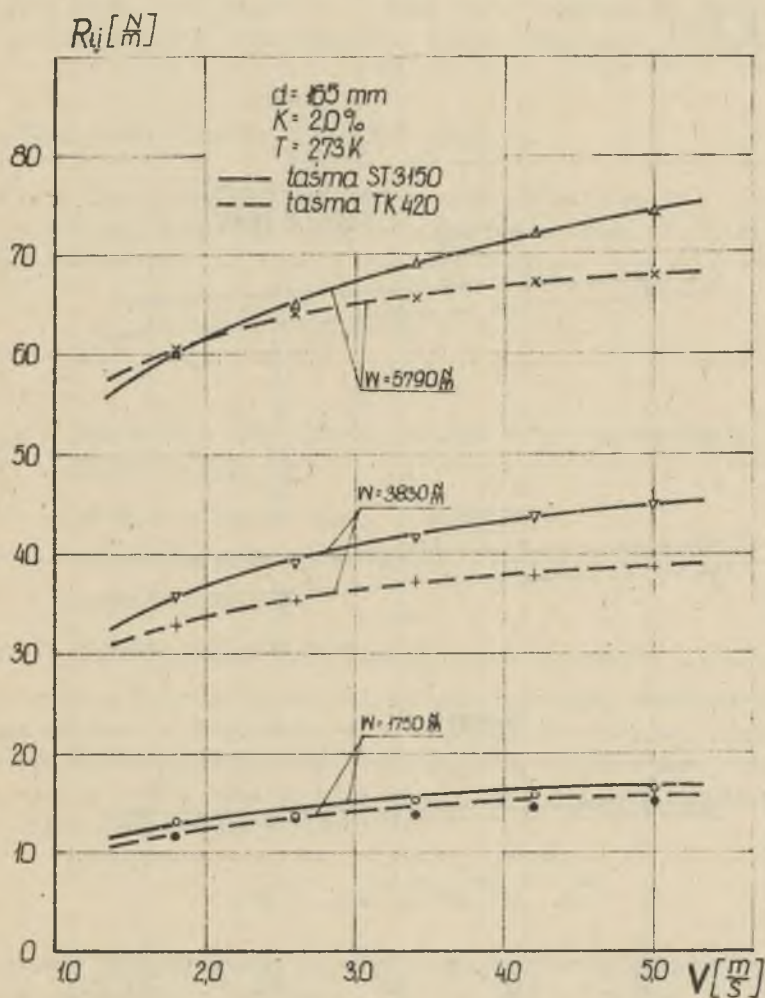
Wpływ napięcia taśmy na jednostkowy opór tarcia tocznego przedstawiono na rys. 5. Charakter zależności jednostkowego oporu tarcia tocznego od napięcia taśmy w badanym zakresie jest praktycznie liniowy. W przypadku badanych taśm przenośnikowych jednostkowy opór tarcia tocznego maleje ze wzrostem napięcia taśmy. Wpływ napięcia taśmy TK420 na jednostkowy opór tarcia tocznego jest większy niż w przypadku taśmy ST3150.

Moduł sprężystości wzdłużnej rdzeni badanych taśm przenośnikowych jest znacznie większy od modułu sprężystości ich okładek. Stan naprężeń wywołanych wzrostem napięcia taśmy zmienia się więc praktycznie tylko w rdzeniu taśmy przenośnikowej. Tak więc prawdopodobnie zależność jednostkowego



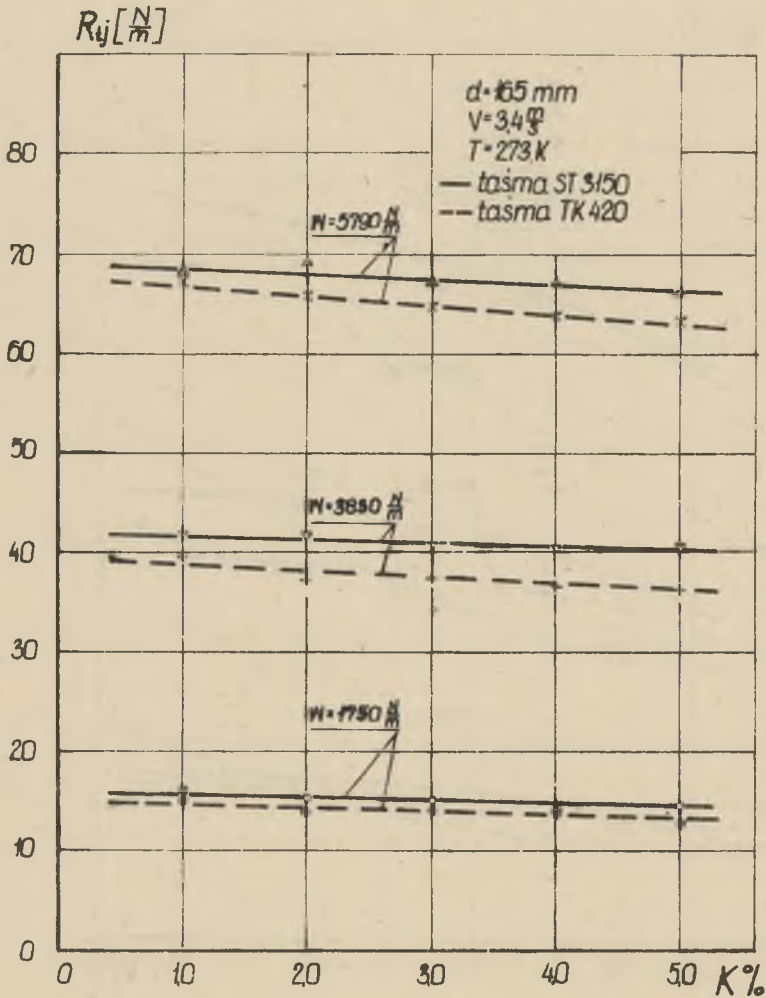
Rys. 3. Zależność jednostkowego oporu tarcia toczonego od temperatury taśmy dla:

$d = 165 \text{ cm}$; $v = 3,4 \text{ m/s}$; $K = 2,0\%$; $W = 1750$; 3830 ; 5790 N/m



Rys. 4. Zależność jednostkowego oporu tarcia tocznego od prędkości taśmy dla:

$d = 165 \text{ mm}$; $K = 2,0\%$; $T = 273 \text{ K}$; $W = 1750$; 3830 ; 5790 N/m



Rys. 5. Zależność jednostkowego oporu tarcia toczonego od napięcia względnego taśmy dla:

$d = 165 \text{ mm}$; $v = 3,4 \text{ m/s}$; $T = 273 \text{ K}$; $W = 1750; 3830; 5790 \text{ N/m}$

oporu tarcia tocznego od napięcia taśmy jest głównie wynikiem oddziaływania stanu naprężeń w rdzeniu taśmy na występujące przy toczeniu krążnika po taśmie przenośnikowej straty energii odkształcenia taśmy.

Dokładne poznanie zjawisk fizykalnych będących przyczyną wpływu napięcia taśmy na opór tarcia tocznego można by uzyskać z doświadczeń o charakterze fizykalnych badań podstawowych, przeprowadzonych w dużym zakresie napięcia taśmy. Przedstawione w pracy wyniki badań oporu tarcia tocznego taśmy przenośnikowej mają charakter fenomenologiczny.

5. MATEMATYCZNE OPRACOWANIE WYNIKÓW BADAŃ

W celu umożliwienia analitycznego wykorzystania wyników badań oporu tarcia tocznego taśmy przenośnikowej wyznaczono funkcję empiryczną ujmującą zależność:

$$R_{tj} = f(W, d, T, v, K) \quad (1)$$

gdzie:

- R_{tj} - jednostkowy opór tarcia tocznego taśmy przenośnikowej, $\frac{N}{m}$
- W - nacisk liniowy, $\frac{N}{m}$
- d - średnica krążnika, mm
- T - temperatura taśmy, K
- v - prędkość taśmy, $\frac{m}{s}$
- K - napięcie względne taśmy, %.

Ze względu na brak funkcjonalnego związku między jednostkowym oporem tarcia tocznego a uwzględnionymi w badaniach wielkościami wpływowymi, którzy wynikałby z wyprowadzeń teoretycznych, do matematycznego opisu uzyskanych wyników badań jednostkowego oporu tarcia tocznego przyjęto równanie regresji wielokrotnej o postaci:

$$R_{tj} = a_0 W^{a_1} d^{a_2} T^{a_3} v^{a_4} K^{a_5} \quad (2)$$

Wartość współczynników regresji cząstkowej można wyznaczyć za pomocą metody najmniejszych kwadratów [1] [4]. W tabeli 3 podano obliczone wartości współczynników regresji a_0, a_1, \dots, a_5 równania (2). Wyznaczona analitycznie wartość współczynnika R^2 wynosi około 0,99, wobec czego przyjęte równanie regresji wielokrotnej (2) bardzo dobrze aproksymuje wyniki badań jednostkowego oporu tarcia tocznego.

Tablica 3

Wartości współczynników regresji cząstkowej równania (2)

Współczynnik regresji	Taśma	
	ST3150	TK420
a_0	$6,065 \cdot 10^{10}$	$1,336 \cdot 10^5$
a_1	1,300	1,305
a_2	- 0,740	- 0,711
a_3	- 5,042	- 2,751
a_4	0,208	0,134
a_5	- 0,041	- 0,061

Tabela 4

Wartości współczynników regresji cząstkowej równania (3)

Współczynnik regresji	Taśma	
	ST3150	TK420
a_0	$5,343 \cdot 10^{10}$	$1,099 \cdot 10^5$
a_1	1,298	1,303
a_2	- 0,740	- 0,711
a_3	- 5,023	- 2,723
a_4	0,211	0,138

Jak wynika z rys. 5 wpływ napięcia względnego taśmy na opór tarcia tocznego jest mały. Potwierdzają to wartości współczynnika regresji cząstkowej a_5 podane w tabeli 3. W związku z tym wpływ napięcia względnego na opór tarcia tocznego jest pomijany [5].

Przeprowadzony przez autora test istotności wpływu napięcia względnego potwierdził możliwość pominięcia tej zmiennej w równaniu (2). Uzyskuje się także dzięki temu uproszczenia równania regresji.

Biorąc pod uwagę powyższe argumenty, wykonano obliczenia współczynników regresji cząstkowej dla równania regresji wielokrotnej o uproszczonej postaci:

$$R_{t,j} = a_0 \cdot W^{a_1} \cdot d^{a_2} \cdot T^{a_3} \cdot v^{a_4} \quad (3)$$

Uzyskane z obliczeń wartości współczynników regresji przedstawiono w tabeli 4.

Równanie (5) należy stosować w zakresie zmian poszczególnych wielkości wpływowych podanych w tabeli 1.

6. WNIOSKI

1. Udowodniono eksperymentalnie tezę, że opór tarcia tocznego taśmy przenośnikowej zależy istotnie od temperatury taśmy w jej zakresie 263 ÷ 303 K (-10-30°C).
2. Wpływ nacisku liniowego, w przypadku badanych taśm przenośnikowych, na jednostkowy opór tarcia tocznego ma charakter funkcji potęgowej o wartości wykładnika około 1,3.
3. Zależność jednostkowego oporu tarcia tocznego od średnicy krążnika i temperatury taśmy ma w zakresie badanym charakter funkcji ściśle monotonicznie malejącej.
4. Wpływ temperatury taśmy na jednostkowy opór tarcia tocznego jest większy w przypadku taśmy ST3150 w porównaniu z taśmą TK420. Jest to wynikiem ich odmiennej budowy strukturalnej i własności lepko-sprężystych zastosowanych materiałów.
5. Bardziej optymalne wykorzystanie mocy napędu przenośnika taśmowego, pracującego w dużym zakresie temperatur otoczenia (przenośniki odkrywkowe), można osiągnąć przy zastosowaniu taśmy o małej zależności oporu tarcia tocznego od jej temperatury. W celu ustalenia charakterystyki taśmy o powyższej właściwości, należy przeprowadzić badania nad wpływem jej postaci konstrukcyjnej, cech geometrycznych i rodzajów zastosowanych materiałów na zależność oporu tarcia tocznego od temperatury taśmy.
6. Zależność jednostkowego oporu tarcia tocznego od prędkości taśmy ma charakter funkcji ściśle monotonicznie rosnącej. Wpływ prędkości taśmy na jednostkowy opór tarcia tocznego jest w przypadku taśmy ST3150 nieznacznie większy w porównaniu z taśmą TK420.
7. Jednostkowy opór tarcia tocznego maleje praktycznie liniowo ze wzrostem napięcia względnego taśmy przenośnikowej. Zależność ta jest prawdopodobnie głównie wynikiem oddziaływania stanu naprężeń w rdzeniu taśmy na występujące przy toczeniu krążnika po taśmie przenośnikowej straty energii odkształcenia.

LITERATURA

- [1] FREUND J.E.: Podstawy nowoczesnej statystyki. PWE, Warszawa 1971.
- [2] KOSTRZEWA H.: Badania wpływu czynników tarcia tocznego na opór ruchu taśmy przenośnikowej przy współpracy z krążnikami nośnymi z uwzględnieniem jej temperatury. Praca doktorska. Gliwice, 1975,

- [3] KOSTRZEWA H.: Układ badawczy do badań oporu tarcia tocznego taśmy przenośnikowej z uwzględnieniem jej temperatury. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, s. "Górnictwo" z. 104, Gliwice 1979.
- [4] VOLK W.: Statystyka dla inżynierów, WNT, Warszawa 1973.
- [5] ŻUR T.: Urządzenia transportowe w górnictwie. Cz. II. Transport taśmowy. Skrypt Politechniki Wrocławskiej. Wrocław 1974.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ТРЕНИЯ КАЧЕНИЯ
КОНВЕЙЕРНОЙ ЛЕНТЫ С УЧЕТОМ ЕЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

Р е з ю м е

В статье рассматривается исследование сопротивления трения качения конвейерной ленты с учетом её температуры. В исследованиях определено зависимость единичного сопротивления трения качения конвейерной ленты от: единичного нажима, диаметра бегуна, температуры, скорости и натяжения ленты. Результаты исследований рассматриваются статически, определяя на этой основе аналитическую зависимость единичного сопротивления трения качения конвейерной ленты, от уже учетных в исследованиях его влияющих величин.

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF THE ROLLING FRICTION RESISTANCE IN THE
CONVEYOR BELT WITH THE ACCOUNT OF ITS TEMPERATURE

S u m m a r y

The paper contains the results of investigations into the rolling friction resistance in the conveyor belt with the account of its temperature. The dependance of unitary rolling friction resistance of the conveyor belt upon: the unitary pressure, the roller and temperature, the speed and tension of the belt was found. The results were statistically analyzed. Basing upon these results, the analytical relationship between the unitary rolling friction resistance of the conveyor belt and its effect values considered in the analyses was defined.