

*poliuretan, krążnik,  
badanie, trwałość*

Lech GŁADYSIEWICZ\*, Robert KRÓL\*

## **KOMPLEKSOWA OCENA JAKOŚCI KRAŻNIKÓW POLIURETANOWYCH STOSOWANYCH W GÓRNICTWIE ODKRYWKOWYM**

W artykule przedstawiono analizę jakości krążników nośnych wykonanych w wersji z płaszczem z poliuretanu, które przeznaczone są do transportu węgla w PGE KWB Turów S.A. Wyznaczono wszystkie parametry użytkowe krążników, będące źródłem informacji o ich stanie technicznym. Przeprowadzono analizę rozkładu efektywnego czasu pracy dla wybranych krążników w oparciu o laboratoryjną metodę badań trwałościowych. Wskazano kierunki dalszych prac mających na celu poprawę aktualnie stosowanej konstrukcji krążnika.

### **1. WPROWADZENIE**

Powszechnie stosowanym środkiem transportu w polskim górnictwie są przenośniki taśmowe. O skali ich zastosowania świadczy fakt, że w roku 2006 tylko w polskich kopalniach węgla brunatnego odnotowano 270 km tras przenośników taśmowych, w kopalniach rud miedzi ponad 120 km tras, a w kopalniach podziemnych węgla kamiennego tylko pod ziemią 1600 km tras przenośników. Do tego należy doliczyć transport taśmowy w kopalniach surowców skalnych i mineralnych: piaskowniach, żwirowniach, kamieniołomy jak również w innych gałęziach przemysłu (cementownie, elektrownie, porty i place przeładunkowe). Coraz dłuższe drogi transportowe oraz zróżnicowane zastosowania sprawiają, że elementy składowe przenośników taśmowych powinny być projektowane, wykonane i eksploatowane z najwyższą dbałością. Wymuszone przez pojedyncze ogniwa transportu taśmowego przerwy czy ogranicze-

---

\* Politechnika Wroclawska, Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii, Instytut Górnictwa, pl. Teatralny 2, 50-051 Wrocław.

nia w przemieszczaniu strumienia transportowanych mas, wpływają bezpośrednio na zmniejszenie efektywności całego układu technologicznego.

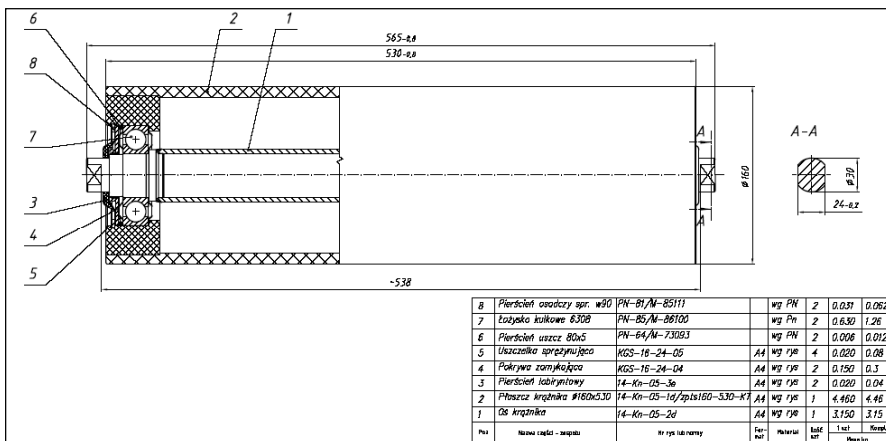
Najliczniejszym elementem ciągłych systemów transportowych, występujący w setkach tysięcy egzemplarzy jest krążnik. Krążniki występujące w liczbie od 2500 do 3600 sztuk na jeden kilometr w istotny sposób wpływają na koszty inwestycyjne i eksploatacyjne przenośnika, mimo że koszt wytworzenia pojedynczego krążnika jest stosunkowo mały w porównaniu do innych elementów przenośnika (jak bębny, przekładnie czy taśma).

Wymagania stawiane krążnikom można sprowadzić do dwóch wzajemnie powiązanych obszarów:

- jakościowych cech uwarunkowanych stosowaną technologią wykonania i jej poziomem technicznym,
- jakościowych cech narzuconych charakterem i parametrami procesu roboczego i warunkami jego realizacji.

Wymienione cechy jakościowe krążników wynikające z ich konstrukcji, używanych materiałów, technologii produkcji oraz stosowanych metod, zakresu kontroli technicznej i mają bezpośredni wpływ na efektywność produkcyjną.

W ostatnim czasie ilościowy rozwój produkcji krążników nie szedł w parze z cechami jakościowymi w zakresie technologii produkcji czy technik kontrolno pomiarowych. Licznie przeprowadzane badania obrazują skalę problemu oraz częste przypadki niskiej jakości krążników. Zdarza się, że produkowane przez przemysł krajowy krążniki nie osiągają parametrów technicznych wymaganych przez normę PN 91/M-46606. Ponadto, szacowana trwałość w stosunku do wielkości zakupów oraz liczby regenerowanych krążników jest mocno niezadowolająca [1, 2].



Rys. 1. Schemat konstrukcji krążnika [5]

Fig. 1. Scheme of the roller layout [5]

## 2. PRZEDMIOT I ZAKRES BADAŃ

Przedmiotem badań były 3 krążniki nośne z płaszczem poliuretanowym, przeznaczone do transportu węgla w PGE KWB Turów S.A. (rys. 1), którym na potrzeby artykułu przypisano kolejno symbole od K-1 do K-3. Przeprowadzone prace miały na celu określenie przydatności analizowanych krążników do zastosowania w górnictwie odkrywkowym i obejmowały swym zakresem sprawdzenie wszystkich, istotnych z punktu widzenia użytkownika parametrów jakościowych, tj. dynamicznego oporu obracania, bicia promienionowego, stopnia niewyważenia dynamicznego oraz trwałość krążników.

## 3. LABORATORYJNA OCENA JAKOŚCI KRAŻNIKÓW

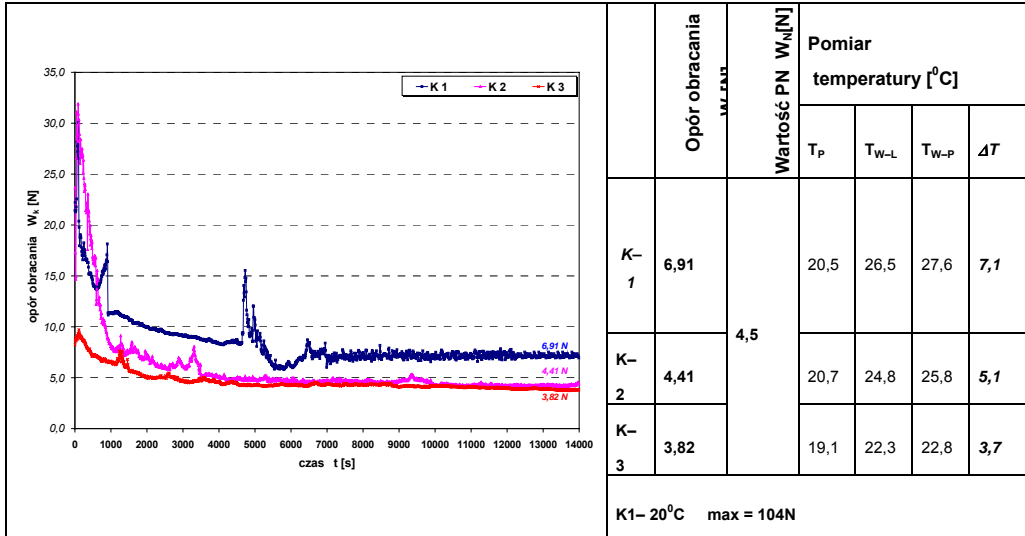
Obowiązująca w Polsce norma PN-91/M-46606 dla krążników przewiduje szereg badań, z których większa część obejmuje rutynowe procedury mające na celu sprawdzenie rzetelności producenta i zgodności z dokumentacją techniczną, tzn.: sprawdzenie wyglądu zewnętrznego, wymiarów, malowania i zabezpieczenia przed korozją oraz cechowania krążnika. Natomiast wyniki badań, zawartych w zakresie przedstawionej analizy – stanowią miary użytkowych cech krążnika, będące źródłem informacji o ich stanie technicznym. Wszystkie badania na zgodność z PN analizowanych krążników przeprowadzono w Laboratorium Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej.

### 3.1. BADANIE DYNAMICZNYCH OPORÓW OBRACANIA

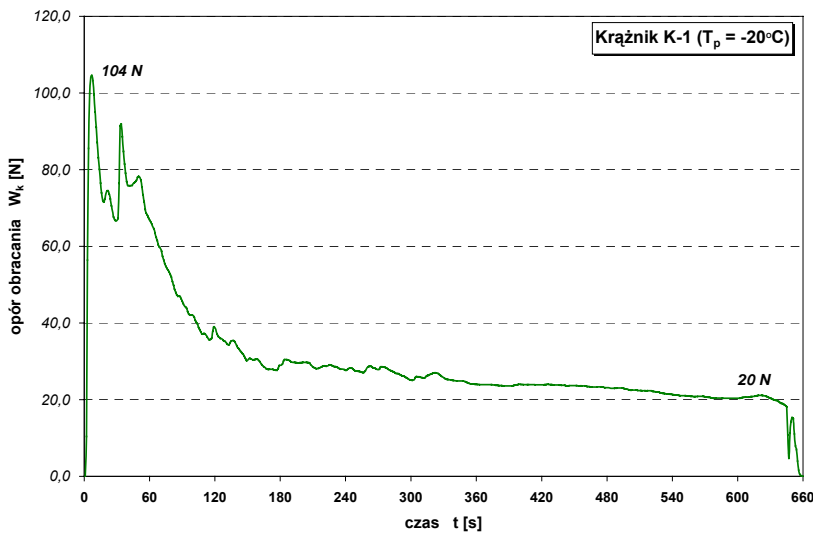
Pierwszym etapem prac było wyznaczenie dynamicznych oporów obracania krążników wraz z pomiarem przyrostów temperatur węzłów łożyskowych, które określają charakter zmian zachodzących w węźle łożyskowym podczas 4 h próby docierania. Szczegółowo metodykę badań wraz z opisem stanowiska pomiarowego przedstawiono w pracy [3]. Zestawienie wyników pomiarów przedstawiono na rys. 2.

Pomiary oporu dynamicznego trzech testowanych krążników wykazały, że krążnik K-1 charakteryzuje się przekroczeniem dopuszczalnej wartości oporu dynamicznego. Parametry dwóch pozostałych krążników K-2 i K-3 mieszają się w zakresie wartości dopuszczalnych. Przebiegi zmian oporu obracania podczas docierania w przypadku krążników K-2 i K-3 świadczą o poprawności ich wykonania, bo nie zachodzą tam gwałtowne zmiany oporu obracania. W krążniku K-1, gdzie zaobserwowano duże skokowe zmiany oporów obracania, występują zjawiska intensywnego docierania elementów tocznych łożyska oraz uszczelnienia. Przyczyn takiego zachowania należy upatrywać w braku dokładności wykonania i montażu krążnika (odchyłkach kształtu i położenia poszczególnych elementów, obfitym smarowaniu). Jednak uściślenie tej

tezy wymaga przeprowadzenia zaawansowanej analizy cech konstrukcyjnych i technologicznych analizowanego typu krążnika.



Rys. 2. Zestawienie wyników pomiarów oporów obracania i temperatury analizowanych krążników  
Fig. 2. Test results of measurements of turning resistance and temperature of tested rollers



Rys. 2. Przebieg zmian oporu obracania w czasie krążnika K-1 w  $T_p = -20^\circ\text{C}$   
Fig. 2. The course of turning resistance of the roller K-1 over a period of time  
at the ambient temperature  $T_p = -20^\circ\text{C}$

Z uwagi na zastosowanie badanych krążników w obszarze górnictwa odkrywkowego, ważnym z punktu widzenia użytkownika jest ich zachowanie w szerszym zakresie temperaturowym. Dlatego wykonano pomiar oporu obracania dla K-1 w temperaturze  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  (rys. 3). Takie działanie będące pewnego rodzaju symulacją pracy krążnika w okresie zimowym wykazało, że podczas rozruchu wartość oporu obracania krążnika wzrasta ok. 18-krotnie (do wartości 104 N).

### 3.2 OCENA STOPNIA NIETYWAŻENIA DYNAMICZNEGO ORAZ BICIA PROMIENIOWEGO

W kolejnym etapie prac sprawdzono nietyważenie dynamiczne krążników oraz ich bicie promieniowe. W trakcie pracy przenośnika krążniki wykonują ruch obrotowy. Jeśli oś obrotu nie pokrywa się z środkiem ciężkości masy krążnika powstaje destrukcyjna siła odśrodkowa proporcjonalna do kwadratu prędkości kątowej oraz masy nietyważenia.

Tabela 1. Zestawienie wyników badań nietyważenia dynamicznego  
Table 1. The results of tests of dynamic unbalance

Krążnik	$M_{kl}$	$M_{kp}$	X	$U_{dop}/2$
K-1	22	25,5	G40	28,31
K-2	24	17,5		
K-3	21,5	19		

Tabela 2. Zestawienie wielkości bicia promieniowego krążników  
Table 2. The results of tests of radial run-out

Krążnik	Miejsce pomiaru	Bicie promieniowe [mm]	PN
K-1	Strona lewa	0,25	0,80
	Środek	0,40	
	Strona prawa	0,55	
K-2	Strona lewa	0,46	
	Środek	0,55	
	Strona prawa	0,58	
K-3	Strona lewa	0,62	
	Środek	0,64	
	Strona prawa	0,68	

Zjawisko to oraz błędy kształtu i mimośrodowe ustawienie płaszczu krążnika powodują drgania podczas jego współpracy z taśmą [4]. W celu określenia niewyważenia wyznaczono wartości niedowagi w dwóch płaszczyznach analizowanych krążników ( $M_{kl}$ ,  $M_{kp}$ ) a następnie określono niewyważenia resztkowe  $U_{dop}/2$ , które zostały przeliczone dla klasy dopuszczalnej G40, zgodnie z wytycznymi normy PN-77/M-04000 pt. „Klasy dokładności wyważenia wirników sztywnych”. Uzyskane wartości wskaźników zestawiono w tabeli 1.

Badania wielkości dynamicznego niewyważenia wykazały, że krążniki zostały wykonane w dopuszczalnej klasie wyważenia, tj. G40. Analogiczne wyniki uzyskano podczas pomiaru bicia promieniowego. Wykonane pomiary geometrii powierzchni płaszczu względem osi obrotu wykazały, że bicie promieniowe przyjętych do analizy krążników jest w normie i nie przekracza wartości 0,8 (tabela 2). Szczegóły dotyczące przyjętej metodyki pomiarowej zawarto w pracy [5].

### 3.3. BADANIA TRWAŁOŚCIOWE KRAŻNIKÓW

O trwałości krążnika decyduje cały szereg parametrów w tym również parametry eksploatacyjne takie jak prędkość kątowna i losowo zmienne obciążenie wywołane działaniem urobku. Metodę określenia wpływu tych czynników na efektywny czas pracy krążników przedstawiono szczegółowo w pracy [6]. Badania trwałościowe opracowano dla potrzeb badań nowych rozwiązań krążników z płaszczem stalowym. Metoda ta opiera na następujących założeniach:

- w eksploatacji na pojedynczy krążnik działa losowo zmienne obciążenie promieniowe i ma ono decydujący wpływ na trwałość krążnika,
- wymagana trwałość krążnika wynosi ok. 5 lat, należy więc oszacować ją po jak najkrótszym okresie badań laboratoryjnych (ok. 3 miesiące badań),
- miarą zużycia eksploatacyjnego krążnika są zmiany jego oporu obracania,
- w badaniach laboratoryjnych krążnik pracuje pod obciążeniem większym od siły ekwiwalentnej (określonej na podstawie zmiennej strugi urobku na przenośniku) w atmosferze zapyłonej i wilgotnej,
- przeliczanie trwałości krążnika dokonuje się w oparciu o ekwiwalentną siłę promieniową i obroty odniesione do warunków laboratoryjnych (współczynnik przyspieszający badania).

Należy przy tym zwrócić uwagę, że nie jest to odwzorowanie rzeczywistych warunków eksploatacyjnych, bo wywoływane są specjalnie takie warunki pracy (większe obroty od obrotów panujących w trakcie eksploatacji) i obciążenia (promieniowa siła obciążająca krążnik jest większa kilkakrotnie od siły ekwiwalentnej ale na poziomie maksymalnych sił występujących podczas eksploatacji). Są to bardziej badania porównawcze umożliwiające szybką ocenę przydatności nowych krążników w porównaniu do krążników modernizowanych, których trwałość jest znana z doświadczeń eksploatacyjnych.

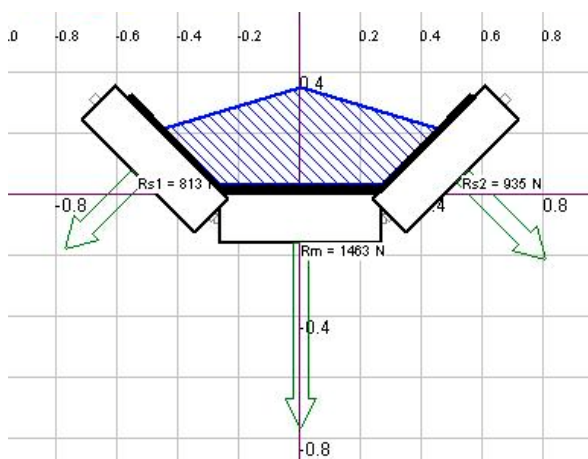
## 3.3.1. WYZNACZENIE REAKCJI DZIAŁAJĄCYCH NA KRĄŻNIK

Do wyznaczenia sił działających na krążnik wykorzystano system komputerowy QNK-TT.

Tabela 3. Parametry przenośnika standardowego B-1400

Table 3. Parameters of the standard belt conveyor B-1400

Parametr	Przenośnik standardowy
Rodzaj transportowanego urobku	Węgiel brunatny wilgotny
Wydajność nominalna/szczytowa	3000 t/h/4000 t/h
Szerokość taśmy	1400 mm
Prędkość taśmy	5,24 m/s
Długość przenośnika	350m
Kąt niecki	45 °
Temperatura otoczenia	0 °C
Oznaczenie taśmy	1400 ST 2500 (12+6) Y
Masa taśmy	38.30 kg/m <sup>2</sup>
Krążnik nośny	160 [mm] × 530 [mm]/9.37 [kg]
Rozstaw zestawów górnych	1,25m
Krążnik dolny	194 [mm] × 750 [mm]/25,30 [kg]
Rozstaw zestawów dolnych	3,0m
opory obracania krążników (zmierzone)	5,0 N
Moc napędu	2 × 630 kW
Zbieganie boczne taśmy	przeciętne (kraweź boczna taśmy nie wybiega poza krążnik boczny)



Rys. 3. Schemat działania reakcji na zestaw krążnikowy

Fig. 3. The scheme of forces acting on an idler

System ten opracowany w oparciu o modelowanie obiektowe dla zadanej konfiguracji trasy, właściwości taśmy oraz cech konstrukcyjnych przenośnika wykonuje m.in. obliczenia sił w taśmie, oporów ruchu i mocy napędu głównego.

Do Umożliwia również uwzględnienie wpływu na obciążenie krążnika losowego zbiegania bocznego taśmy i urobku [7]. analizy wybrano przenośnik standardowy (B-1400) będący typową, powszechnie stosowaną konstrukcją w odkrywkowych kopalniach węgla brunatnego w Polsce. Podstawowe parametry przenośnika standardowego zestawiono w tabeli 3.

W wyniku przeprowadzonej symulacji dla analizowanego przenośnika otrzymano reakcje działające na zestaw krążnikowy, które przedstawiono na rys. 3. Do przyspieszonych badań trwałościowych, jako właściwą i miarodajną przyjęto reakcję występującą na krążniku środkowym, która wynosi  $R_m = 1463$  N.

### 3.3.2. WYZNACZENIE WSPÓLCZYNNIKA PRZYSPIESZAJĄCEGO

Podstawą wnioskowania o trwałości eksploatacyjnej krążnika jest określenie trwałości jego łożysk. Zakłada się, że trwałość krążnika wyrażana w liczbie obrotów łożyska jest zależna od obciążenia poprzecznego w trzeciej potęgde (założenie słuszne dla łożysk kulkowych) i może być aproksymowana wyrażeniem:

$$N \cdot P^3 = \text{const}$$

Znając prędkość liniową taśmy  $v_t$  oraz średnicę krążnika  $D_k$  możliwe jest określenie jego prędkości obwodowej  $n_{\text{eksp}}$  ze wzoru:

$$n_{\text{eksp}} = \frac{60 \cdot v_t}{\pi \cdot D_k} \text{ [obr/min]}$$

Zadając w warunkach laboratoryjnych wymuszoną prędkość obrotową krążników  $n_l$  uzyskuje się współczynnik przyspieszający czas badań na poziomie:

$$k_n = \frac{n_l}{n_{\text{eksp}}}$$

Dwukrotnie większa prędkość obrotowa w warunkach laboratoryjnych  $n_l$  w porównaniu do prędkości eksploatacyjnej  $n_{\text{eksp}}$  daje współczynnik przyspieszający badania  $k_n = 2$ .

Podobnie w przypadku obciążenia wyznacza się współczynnik  $k_p$ , który jest ilorazem z siły  $P_l$  (wywołanej przez zespół obciążający na stanowisku) i zastępczej reakcji  $R_m$  (określonej na podstawie losowego przebiegu wydajności) podniesionym do trzeciej potęgi, czyli:

$$k_p = \left( \frac{P_l}{R_m} \right)^3$$



Trzykrotnie większa siła obciążająca w warunkach laboratoryjnych  $P_1$  w porównaniu do siły zastępczej  $R_m$  daje współczynnik przyspieszający badania  $k_p = 27$ .

Całkowity współczynnik określający skrócenie czasu badań w warunkach laboratoryjnych wynosi:

$$k = k_n \cdot k_p = 54$$

W związku z tym można przyjąć, że 1 godzina badań laboratoryjnych krążnika odwzorowuje około 54 godziny jego pracy w warunkach eksploatacyjnych, na analizowanym przenośniku węglowym PGE KWB „Turów” S.A. przy losowo zmiennej strudze urobku (3000 h pracy przenośnika w ciągu jednego roku kalendarzowego).

Przyjęto założenie, że miarą oceny krążnika w długotrwałym okresie obciążeń będą zmiany oporu obracania. Zmiany te wynikają ze zjawiska tarcia i zużycia elementów łożysk oraz uszczelnień. Dlatego, po każdych 54 godzinach pracy dokonywano pomiaru oporu obracania krążników. Odstępstwem od tej reguły był pomiar pierwszy, który w związku ze stopniowo narastającym charakterem obciążeń w określonych odstępach czasowych krążników, przeprowadzono po 82 h.

### 3.3.3. WYNIKI BADAŃ TRWAŁOŚCIOWYCH

Badania trwałościowe krążników z płaszczem z poliuretanu (K-2, K-3) przeprowadzono na stanowisku pomiarowym przedstawionym na rysunku 4.

W celu uniknięcia nadmiernych dla poliuretanu cyklicznie zmieniających się naprężeń zginających i ścinających obciążenia zadawano w bliskiej odległości od łożyska, a nie jak w przypadku krążników stalowych na środku płaszcza krążnika. Odległość przyłożonej siły promieniowej  $N$  od krawędzi płaszcza krążnika  $a$  (rys. 5) wynosiła 8 cm. W badaniach siła  $N$  narastała stopniowo w określonych odstępach czasowych (patrz tabela 4) aż do poziomu 4,4 N, dla którego uzyskano współczynnik przyspieszający  $k = 54$ . W dalszej części badań, po opracowaniu wybranych przedziałów czasowych przeprowadzano pomiary ich oporów obracania. Ponadto, podczas przeprowadzanych badań, używając przyrządu do zdalnego pomiaru temperatury rejestrowano jej przyrost w trzech punktach pomiarowych: na płaszczu – w miejscu współpracy z oponą oraz na czopie 1 – po stronie obciążanego węzła łożyskowego oraz na czopie 2 – przeciwległym. Zestawienie wielkości zadawanych obciążeń oraz rejestrowanych temperatur przedstawiono w tabeli 4.

W wyniku przeprowadzonych badań trwałościowych, po ok. 213 h (3,5 roku) krążnik oznaczony symbolem K-3 uległ zniszczeniu. Zaobserwowano trwałe uszkodzenie płaszcza powstałe w wyniku jego pęknięcia. Krążnik K-2 wykazał się wyższą trwałością – na poziomie 4,5 lat, ulegając uszkodzeniu po ok. 276 h pracy w warunkach laboratoryjnych (rys. 6).

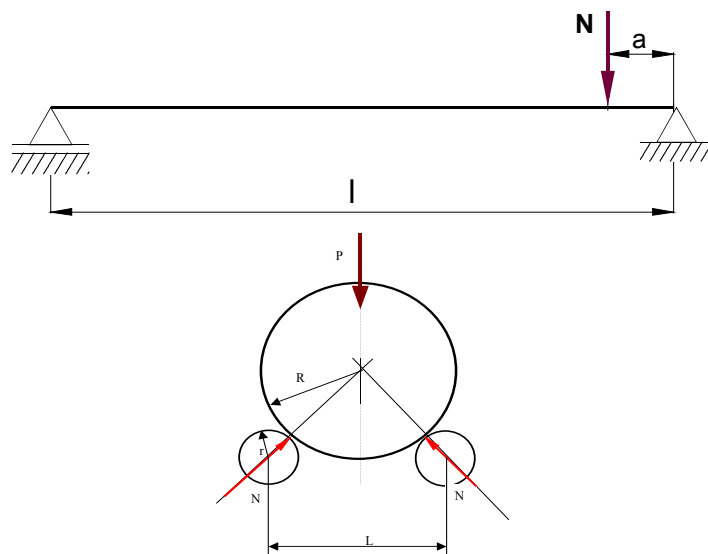


Rys. 4. Stanowisko pomiarowe do badań trwałościowych krążników  
Fig. 4. Test test rig for durability tests of rollers

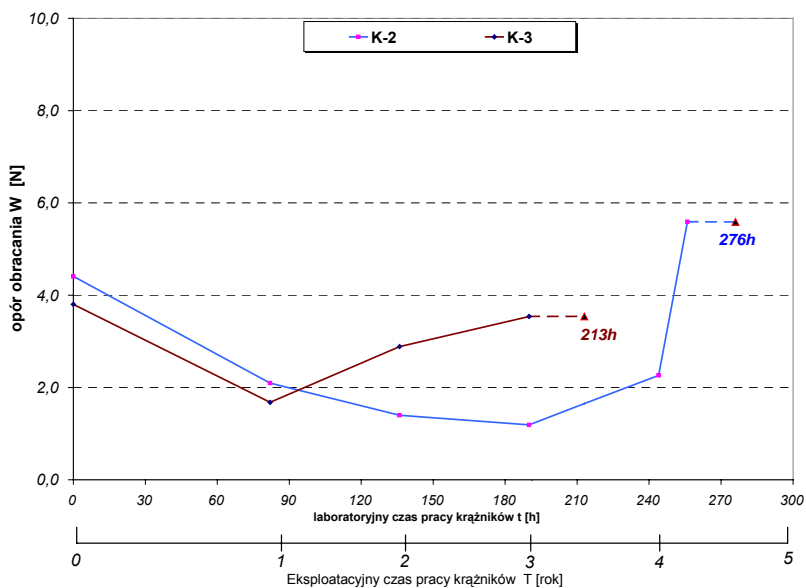
Tabela 4. Zestawienie zakresu zadawanych obciążeń  
oraz wielkości zarejestrowanych temperatur  
Table 4. The scope of loadings and recorded temperatures

Czas	Obciążenie P [kN]	Siła N [kN]	Temperatura [°C]					
			opona/płaszcz		Czop 1		Czop 2	
			K-2	K-3	K-2	K-3	K-2	K-3
0–3 h	2	1,62	37,6	40,0	44,0	34,9	44,1	45,2
3–6 h	3	2,40	40,6	40,3	46,2	42,2	46,0	47,2
6–12 h	3,5	2,80	47,3	47,2	46,0	43,4	47,0	46,5
12–82 h	6,0	4,40	58,0	55,0	44,2	44,5	50,2	52,8
120 h	6,0	4,40	61,0	62,2	41,2	51,5	38,6	49,3
160 h	6,0	4,40	63,2	69,0	45,5	68,5	42,0	70,2
248 h	6,0	4,40	68,2	–	66,5	–	69,7	–

Nie jest to poziom dorównujący dobrem krążnikom z płaszczem stalowym ale w grupie badanych do tej pory w Laboratorium Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej krążników z płaszczem z tworzyw sztucznych wyróżnią się względnie dużą trwałością.



Rys. 5. Modelowy schemat działania zadawanych obciążeń promieniowych  
 Fig. 5. The model of layout of radial loadings



Rys. 6. Przebieg zmian oporów obracania w trakcie analizy trwałościowej krążników K-2 i K-3

Fig. 6. Change of turning resistance of rolls K-2 and K-3 during durability tests

Z uzyskanej charakterystyki trwałościowej przedstawiającej czasowy przebieg zmian oporu obracania można zauważyć stosunkowo krótki czas stabilnej pracy krążnika. Po pierwszym okresie docierania charakteryzującym się spadkiem oporu obracania w dobrym elemencie roboczym (krążniku) powinien nastąpić okres stabilizacji (względnie stały opór obracania), po który dopiero następuje okres przyspieszonego zużycia kończący pracę krążnika. W obu przebadanych krążnikach okres docierania bardzo szybko przechodzi w okres przyspieszonego zużycia, przez co trwałość eksploatacyjna mieści się w przedziale 3,5–4,5 lat.

#### 4. WNIOSKI

1. Na podstawie przeprowadzonych badań dynamicznych oporów obracania stwierdzono, że krążnik oznaczony symbolem K-1 osiągając wartość 6,91 N, nie spełnia wymagań stawianych przez obowiązującą PN. Wartości oporów obracania pozostałych krążników nie przekroczyły wartości dopuszczalnej, tj. 4,5 N.
2. Pomiary geometrii powierzchni płaszcza względem osi obrotu krążnika wykazały, że bicie promieniowe przyjętych do analizy krążników jest w normie.
3. Badania wielkości dynamicznego niewyważenia wykazały, że krążniki zostały wykonane w dopuszczalnej klasie wyważenia, tj. G40.
4. Z wyłączeniem krążnika K-1, który okazał się elementem wadliwym, badane dwa pozostałe krążniki wykazały w testach trwałościowych właściwości wskazujące na ich trwałość eksploatacyjną na poziomie 3,5–4,5 lat. Krótki czas stabilizacji krążników jaki zaobserwowano na wyznaczonych charakterystykach zmian oporu obracania podczas badań trwałościowych, a w związku z tym szybko zachodzące procesy zużycia ciernego, nie pozwoliły uzyskać trwałości oczekiwanej przez użytkownika – na poziomie 5 lat. Celowe wydaje się więc przeanalizowanie konstrukcji uszczelnienia i łożyskowania łącznie z doborem odpowiedniego smaru w celu poprawy parametrów trwałościowych badanych krążników.
5. W dotychczasowych badaniach trwałościowych krążników z płaszczem poliuretanowym występowała zawsze ta sama forma zniszczenia – pęknięcie płaszcza na całym obwodzie w pobliżu węzła łożyskowego. Ta forma zniszczenia jest spowodowana zmęczeniem cieplnym materiału płaszcza w wyniku zmiennych naprężeń zginających i ścinających. W przebadanych krążnikach doszło do podobnego uszkodzenia, po stosunkowo długim okresie pracy, niemniej forma zniszczenia może być zagrożeniem dla bezpiecznej pracy przenośnika taśmowego.