

Received: 01.07.2014, accepted: 29.07.2014

*Taśma przenośnikowa, taśmy typu St,
rdzeń z linek, detekcja uszkodzeń,
skaner magnetyczny, diagnostyka stanu*

Ryszard BŁAŻEJ¹ Arkadiusz DOMAŃSKI²,
Leszek JURDZIAK^{1*}, Maciej MARTYNA³

PROGNOZY ZMIAN STANU RDZENIA TAŚM TYPU ST NA PODSTAWIE CZASU PRACY ODCINKÓW TAŚM I DŁUGOŚCI PRZENOŚNIKA

Przedstawiono pierwsze wyniki badań zmiany stanu rdzenia taśm z linkami stalowymi w zależności od czasu pracy odcinków i długości przenośnika. Stan rdzenia pętli taśm badano różnymi skanerami magnetycznymi: HRDS (zmodyfikowany system EyeQ) oraz skanerem firmy LRM. W pierwszym przypadku zbadano taśmy w jednej z kopalń węgla brunatnego, a w drugim pętlę taśm na przenośniku w jednej z kopalń węgla kamiennego. W ramach badań określano ilość uszkodzeń przypadającą na 1 metr bieżący taśmy. Dobrano krzywe regresji dla tempa narastania uszkodzeń w czasie pracy taśmy. Z uwagi na wykazany wpływ długości przenośnika na ilość energii akumulowanej przez taśmę (model trwałości taśmy prof. T. Żura) zbadano wpływ tego czynnika na tempo narastania uszkodzeń. Dobrano nieliniową regresję 2 zmiennych. Są to pierwsze ilościowe wyniki takich badań w Polsce i na świecie. Potwierdzają przypuszczenia, że z upływem czasu tempo pojawiania się uszkodzeń się zwiększa, a jego identyfikacja może pozwolić na prognozę momentu wymiany taśmy.

¹ Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii, Politechnika Wroclawska

² PGE GiEK SA Oddział KWB Turów.

³ Laboratorium Romana Martyny (LRM-NDE)

* Corresponding author: leszek.jurdziak@pwr.edu.pl

1. PIERWSZE ILOŚCIOWE WYNIKI ANALIZ STANU RDZENIA TAŚM ST

Od jakiegoś czasu w Polsce niektórzy użytkownicy taśm korzystają ze skanerów zmian pola magnetycznego pozwalających ocenić stan uszkodzeń rdzenia taśm z linkami stalowymi (taśm typu St). Skanowanie taśm rozpoczęła kopalnia węgla brunatnego, która zakupiła urządzenie EyeQ i rozpoczęła przy jego użyciu badanie rdzenia taśm kierowanych do regeneracji (Błażej i inni, 2010). Wykorzystanie tego urządzenia przy klasyfikacji taśm pozwalało zaoszczędzić energię na sfrezowanie okładek, gdyż dopiero wtedy bez urządzenia można było określić w przybliżeniu stan rdzenia. Okazjnie pracownicy kopalni skanowali też taśmy na przenośnikach w kopalni, jak i poza nią (u innych użytkowników). Po modyfikacji urządzenia (Błażej i inni, 2010; Błażej, 2014) i zmianach organizacyjnych (outsourcing usług regeneracji i napraw taśm) urządzenie zostało skierowane do analizy stanu rdzenia taśm pracujących na przenośnikach. W wyniku tych badań w pracy (Domański, 2014) zebrano pierwsze wyniki z analiz uszkodzeń taśm na kilku przenośnikach przeprowadzonych w odstępie 15 miesięcy.

W kopalni węgla kamiennego zaczęto używać skanerów pola magnetycznego na długich przenośnikach wyposażonych w taśmy typu St. W jednej z nich zdecydowano się na skanowanie taśm na najważniejszym przenośniku, z uwagi na konieczność zapewnienia jego wysokiej niezawodności. Do przeprowadzenia skanowania pętli taśmy zatrudniono firmę Laboratorium Romana Martyny (LRM).

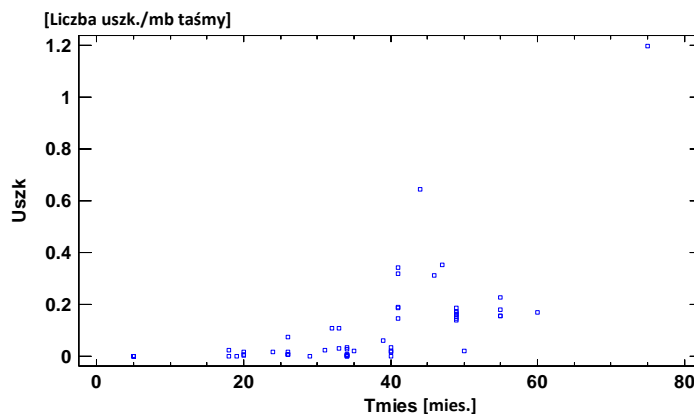
2. ZMIANY STANU RDZENIA TAŚM ST W KOPALNI WĘGLA BRUNATNEGO

Zebrane dane o wykrytych uszkodzeniach rdzeni w pętlach taśm na 3 przenośnikach (Domański, 2014) poddano obróbce statystycznej w programie STATGRAPHICS Centurion XVI v.16.1.17. w ramach wcześniej rozpoczętej pracy badawczej (Błażej i inni, 2012). Posłużyły one do identyfikacji tempa zmian gęstości uszkodzeń (liczby uszkodzeń odcinka taśmy przeliczonej na 1 metr bieżący taśmy) w czasie. Każdy z analizowanych przenośników był skanowany dwa razy w odstępie 15 miesięcy. Dzięki temu, że w pętlach były zainstalowane odcinki o różnych dotychczasowych czasach pracy można było zbadać stan uszkodzeń dla szerszego spektrum dotychczasowych czasów pracy. Dwukrotny pomiar nie pozwolił na zbadanie indywidualnych trajektorii uszkodzeń (dwa punkty to stanowczo zbyt mało by wyrokować o charakterze zmian), to jednak można było zbadać charakter zmian dla wielu odcinków rozpatrywanych razem. Można też było zbadać wpływ długości przenośnika na poziom i przyrost uszkodzeń, gdyż przenośniki miały różną długość.

Były to pierwsze badania tego typu, dlatego ich wyniki można uznać za pionierskie. Wcześniej firmy serwisowe sporządzały jedynie indywidualne raporty opisujące

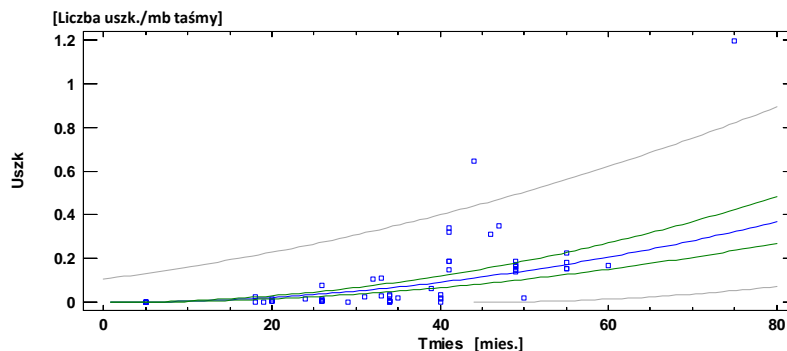
poziom uszkodzeń, jednak nie próbując znaleźć skwantyfikowanych ogólnych reguł dla zagregowanych wskaźników stopnia zużycia odcinków taśm. Prognozę pozostałego czasu sporządzano indywidualnie na podstawie dotychczasowego tempa ścierania się okładek nośnych i bieżnych na podstawie dyskretnych pomiarów grubości okładek w wybranych punktach. Taki sposób postępowania wynikał z faktu, że pomiarów stanu dokonywano na wybranych, najważniejszych przenośnikach i nie analizowano danych w skali masowej.

Na początku badań przedstawiono wyniki obliczeń poziomu gęstości uszkodzeń w zależności od dotychczasowego czasu pracy odcinków taśm. Można oczekiwać, że wiek taśm będzie miał wpływ na poziom uszkodzeń. Wizualnie można to przedstawić na rysunku punktowym, obrazującym zmiany gęstości uszkodzeń odcinków taśm w różnym wieku (z pierwszego i drugiego badania) (rys. 1).



Rys. 1. Zmiany gęstości uszkodzeń odcinków taśm w zależności od czasu ich pracy (w mies.).

Fig. 1. Changes in the failures density of belt sections depending on their current working time (in months).



Rys. 2. Zmiany poziomu gęstości uszkodzeń z dobranym modelem funkcji kwadratowej (2).

Fig. 2. Changes in the failures density of belt sections with selected square model (2)

Przeprowadzone analizy regresji linowej i nieliniowej dla 27 modeli pozwoliły wybrać najlepsze z nich. Okazało się, że relację pomiędzy poziomem uszkodzeń (Uszk) a czasem pracy podanym w miesiącach (Tmies) najlepiej odwzorowuje funkcja dwukwadratowa i zależność ta jest istotna statystycznie przy 95% poziomie ufności ($R^2=83.30\%$).

$$\text{Uszk} = (0.000167781 * \text{Tmies}^2)^2 \quad (1)$$

Drugim najlepszym modelem była funkcja kwadratowa (2), której stopień dopasowania był tylko trochę gorszy ($R^2=77.08\%$).

$$\text{Uszk} = (0.00758359 * \text{Tmies})^2 \quad (2)$$

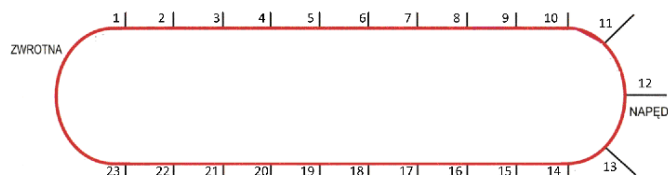
3. ZMIANY STANU RDZENIA TAŚM W KOPALNI WĘGLA KAMIENNEGO

Firma Laboratorium Romana Martyny (LRM) od kilku lat serwisuje pętle taśm przenośnika węglowego o długości ponad 2 km w jednej z kopalń na Górnym Śląsku. Regularne pomiary stanu rdzenia pętli taśm pozwoliły zidentyfikować zmiany stanu uszkodzeń w czasie. Przykładowe wyniki dla jednego z badanych odcinków przedstawiono w tabeli 1.

Tab.1 Uszkodzenia jednego z odcinków taśmy(200 m) po interpretacji wyników skanowania.
Tab.1 Damages of one of belt sections (200 m) after interpretation of scans.

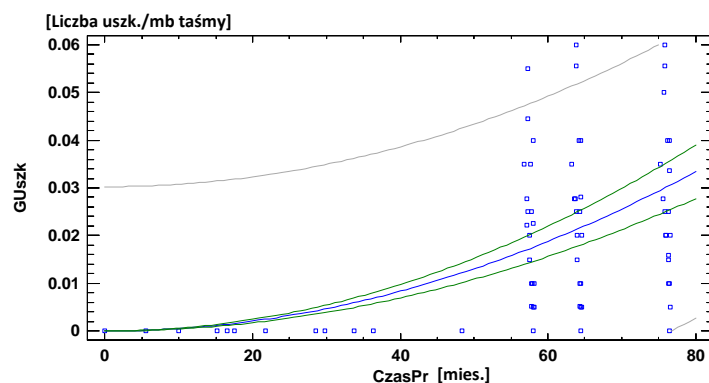
odległość [m] uszkodzenia od końca łączenia ZL_1	nr odcinka OdcK					
	nr łączenia	ZI1	---	ZI_2		
położenie uszkodzenia [mm] licząc od przejścia						
	0-250	250-500	450-700	700-950	900-1150	1150-1400
46,66						OdcK B1 →
59,08						OdcK -B2 X
71,40						OdcK -B3 →
72,84	OdcK -B4					→
44,80						OdcK -B5 X
15,00	OdcK -B6					

Zidentyfikowane uszkodzenia z położeniem wzdłuż taśmy od złącza ZL_1 (X) oraz w kolejnych torach pomiarowych o szer. 250 mm. Bi – to numer uszkodzenia w kolejności identyfikacji. Kodem graficznym oznaczono zmiany intensywności uszkodzenia (↑ – wzrost, → – brak wzrostu, X – brak sygnału). Kolorami zakodowano terminy badania. Wiersze tabeli bez koloru oznaczają wyniki pomiarów z listopada 2012 roku, w kolorze szarym – uszkodzenia wykryte podczas inspekcji z maja 2013, a w kolorze zielonym: nowe uszkodzenia wykryte podczas inspekcji z czerwca 2014.



Rys. 3. Pętla taśmy 1400 ST 4500 na jednym z przenośników w kopalni węgla kamiennego
 Fig. 3. Loop of the 1400 ST 4500 belt on one of conveyors in hard coal mine

W pętli taśm (rys. 3) znajdują się 23 odcinki, z których większość ma długość 180-200 metrów. Kilka odcinków (4) o długości ok. 20 metrów wstawiono przy wymianie połączeń i to one z uwagi na krótszy czas pracy oraz niewielkie długości nie mają żadnych uszkodzeń (rys. 4). Pełne dane o pętli taśm nie mogą być jednak ujawnione.



Rys. 4. Wykres zmian gęstości uszkodzeń dla różnych odcinków taśm na przenośniku o długości 2 km z dobraną funkcją kwadratową $Y = b \cdot X^2$ ($b = 0.00000521741$, $R^2 = 67.3\%$)

Fig. 4. Changes of damage density for different belt sections on a conveyor having 2 km length with selected quadratic function $Y = b \cdot X^2$ ($b = 0.00000521741$, $R^2 = 67.3\%$)

Prawie wszystkie uszkodzenia zostały zidentyfikowane w kilku pomiarach dokonanych po raz pierwszy po prawie 5 latach eksploatacji. Nie pozwala to na prześledzenie pełnej trajektorii rozwoju gęstości uszkodzeń w czasie od momentu ich pojawienia się. Udało się jednak dobrać krzywe regresji o średnio silnym dopasowaniu. Najlepsze dopasowanie (pod względem wartości R^2) wykazał model liniowy ($Y = aX$, $a = 0.000352381$, $R^2 = 67.45\%$), ale niewiele gorszy wynik miała funkcja kwadratowa ($Y = bX^2$, $b = 0.00000521741$, $R^2 = 67.3\%$, rys. 4). Bez zbadania poszczególnych trajektorii uszkodzeń określonych dla większej liczby odcinków taśm trudno rozstrzygnąć, który model dokładniej opisuje rzeczywistość. Wiele (zwłaszcza wyniki z kopalni węgla brunatnego) wskazuje, że zmiany gęstości uszkodzeń odbywają się wg

funkcji kwadratowej. Będzie miało to istotne znaczenie przy prognozowaniu pozostałego czasu pracy poszczególnych odcinków.

4. WPLYW DŁUGOŚCI PRZENOŚNIKA NA TEMPO ZUŻYWANIA SIĘ TAŚM

Zaproponowana w pracach Żura (1975, 1980 i 1983) oryginalna metoda określania trwałości taśm w zależności od różnych parametrów technicznych taśmy i przenośnika oraz warunków eksploatacji wprowadziła podział czynników powodujących zużywanie się taśmy na działające „punktowo” (tzn. w konkretnych miejscach przenośnika, np. nadawa, urządzenia czyszczące, napęd itp.) i działające „liniowo” (wzdłuż całej trasy przenośnika, np. tarcie o krążniki i ograniczenia boczne itp.). Opierając się na założeniu, że suma uszkodzeń „punktowych” jest proporcjonalna do liczby obiegów taśmy wokół przenośnika, a suma uszkodzeń „liniowych” jest proporcjonalna do drogi odbytej przez wybrany przekrój taśmy Żur zaproponował wzór na obliczenie trwałości taśmy, mierzonej czasem jej pracy t_t (Żur, 1975 i 1983):

$$t_t = \frac{A_t L_t}{v \sum_p A_p + v L_t A_j}, [\text{s}] \quad (3)$$

gdzie: L_t – całkowita długość taśmy przenośnikowej ($\cong 2 L_p$), m,

L_p – długość przenośnika, m,

A_t – praca którą należy włożyć aby taśma uległa zużyciu, J/m,

$\sum_p A_p$ – suma prac uszkodzeń "punktowych", J,

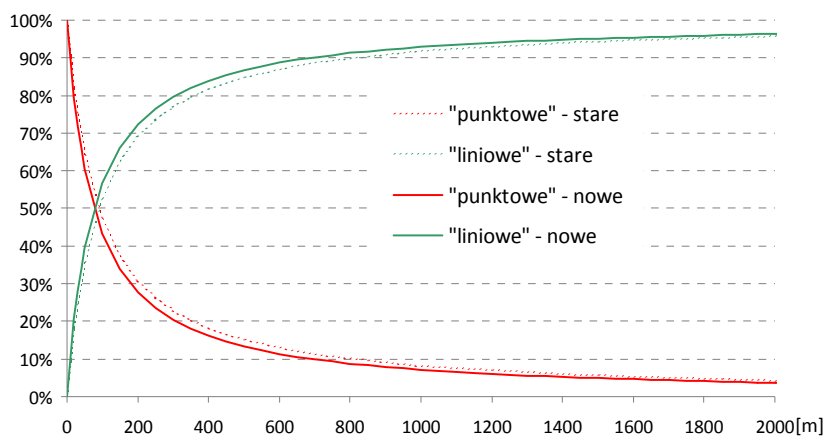
A_j – praca uszkodzeń liniowych, J/m,

v – prędkość taśmy, m/s.

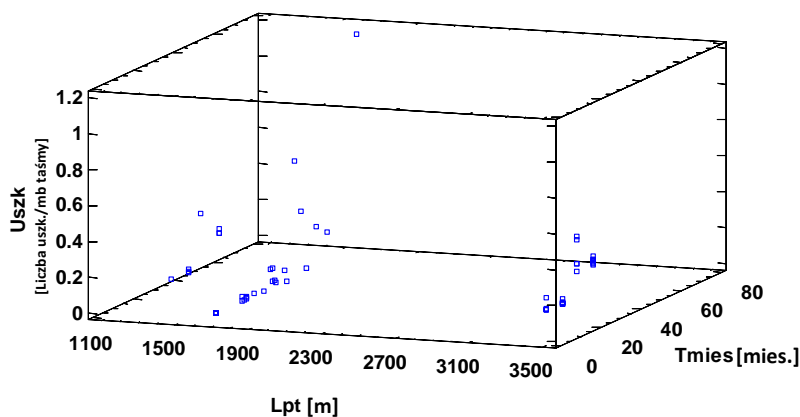
W pracy (Jurdziak, 1988) na podstawie danych z jednej z kopalń rud miedzi i analizy wykonanych przez odcinki taśm cykli obiegów wokół przenośnika udało się autorowi zidentyfikować zmiany udziału tych czynników w procesie zużycia taśmy wraz ze zmianą długości pętli taśmy (długości przenośnika). Ostatnio przeprowadzono podobną analizę dla zaktualizowanych danych pochodzących z tej samej kopalni (Jurdziak i Błażej, 2014). Pomimo znacznego upływu czasu, istotnego wzrostu trwałości (wzrost o ponad 30%) i jakości taśm udziały czynników „punktowych” i „liniowych” nie uległy prawie wcale zmianom (rys. 5). Potwierdza to konieczność łącznego rozpatrywania dwóch czynników mających wpływ na trwałość taśm: czasu pracy (lub innej miary trwałości, np. cykli, przeniesionej masy urobku itp.) oraz długości przenośnika.

5. ZMIANY GĘSTOŚCI USZKODZEŃ W FUKCJIDŁUGOŚCI PĘTLI I CZASU PRACY

Zmiany gęstości uszkodzeń w zależności od długości pętli taśmy (Lpt) i dotychczasowego czasu pracy (Tmies) można zaobserwować na wykresie punktowym XYZ (rys. 6).



Rys. 5. Procentowy udział „punktowych” i „liniowych” czynników uszkodzających w procesie zużywania się taśmy w zależności od długości przenośnika (w metrach)
Fig. 5. Variation of percentage contribution of “local” and “linear” damaging agents in conveyor belt wear process as a function of conveyor length (in meters)



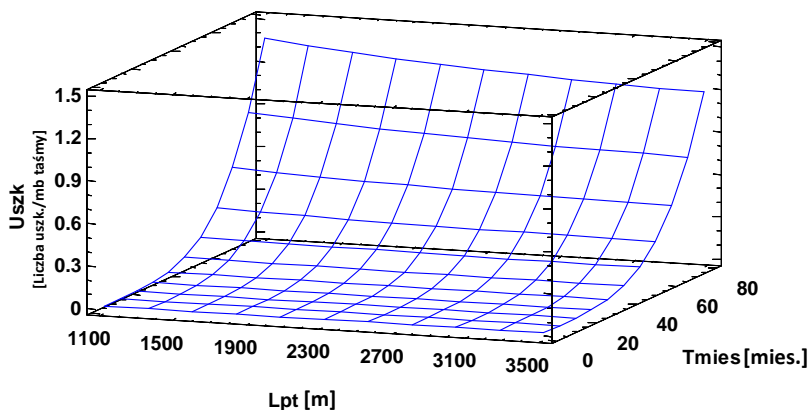
Rys. 6. Wykres punktowy gęstości uszkodzeń (Uszk) w zależności od długości pętli taśm (Lpt) i dotychczasowego czasu pracy odcinków taśm podanego w miesiącach (Tmies).
Fig. 6. Scatterplots of belt failures density (Uszk) depending on the length of the belt loop (Lpt) and the current working time of belt segments given in months (Tmies).

Próby znalezienia modelu regresji nieliniowej gęstości uszkodzeń od dwóch zmiennymi niezależnymi: dotychczasowego czasu pracy (w mies.) i długości pętli taśm doprowadziły do następującej postaci funkcji dwóch zmiennych:

$$Uszk = (0.0601411 + 2.35348E-7 * Tmies^4) / (\log(Lpt)) \quad (4)$$

Stopień dopasowania, który można określić jako średnio mocny ($R^2 = 64.42\%$), okazał się istotny statystycznie.

Uzyskane modele mogą być wykorzystane do predykcji optymalnego momentu wymiany odcinka taśmy w pętli.



Rys. 7. Wykres powierzchni odpowiedzi dla regresji nieliniowej gęstości uszkodzeń od długości pętli taśm i dotychczasowego czasu pracy odcinków taśm podanego w miesiącach

Fig. 7. Graph of response surface for non-linear regression of the belt failures density from the length of the belt loop and current working time of belt segments given in months

6. POTENCJAŁ PROGNOSTYCZNY GROMADZONYCH DANYCH

Wyniki pierwszych analiz stanu rdzenia przy użyciu skanerów magnetycznych są obiecujące. Wprawdzie dane uzyskane z różnych urządzeń są nieporównywalne (urządzenia wykorzystują odmienne technologie i mają różną czułość), to jednak badanie tych samych taśm jednym urządzeniem w różnym czasie pozwala zauważyć istotne prawidłowości.

Po pierwsze potwierdzono, że wraz z upływem czasu tempo przyrostu gęstości uszkodzeń się zwiększa i to nie tylko liniowo, lecz w zgodzie z funkcją potęgową (np. można dopasować model funkcji kwadratowej).

Po drugie, zauważono, że warto prowadzić badania zmian stanu rdzenia przy użyciu innych miar trwałości taśmy np. liczby wykonanych przez pętlę taśmy cykli. Tu z braku miejsca analizowano jedynie czas kalendarzowy. Analiza cykli obrotów pętli wokół przenośnika pozwoli nie tylko poszerzyć grupę porównawczą o taśmy pracujące na przenośnikach o różnej długości i o różnej prędkości taśm (Jurdziak, 1988), lecz również umożliwi bardziej precyzyjne zidentyfikowanie wpływu analizowanych czynników („punktowych” i „liniowych”).

Po trzecie, przeanalizowano wpływ długości przenośnika na tempo narastania uszkodzeń, co potwierdza wcześniejsze badania i wskazuje, że indywidualne dobieranie funkcji zmian trajektorii uszkodzeń w czasie dla każdego odcinka taśmy z osobna powinno być najlepszym rozwiązaniem. Dalsze prace nad identyfikacją charakteru tych zmian mogą doprowadzić do opracowania metodyki prognozy optymalnego momentu wymiany.

Pomimo zidentyfikowania tych prawidłowości należy jednak ostrożnie formułować kategorię sady i potwierdzać poprawność modeli na podstawie początkowych badań. Spory rozrzut gęstości uszkodzeń rdzeni różnych odcinków tej samej taśmy w tym samym wieku (rys. 4) może sugerować, że na tempo narastania uszkodzeń ma wpływ nie tylko wiek taśmy, ale również wcześniejsze uszkodzenia, którym jedne taśmy uległy w sposób losowy (i te zużywały się później szybciej), a inne nie (i w nich proces zużycia następował znacznie wolniej). Dlatego warto badać nie tylko zagregowane wskaźniki zużycia, lecz również rozwój uszkodzeń indywidualnych i przestrzenne zależności pomiędzy uszkodzeniami. Można przypuszczać, że powstanie pierwszych uszkodzeń może zwiększać prawdopodobieństwo pojawienia się następnych. Sugerują to różnice w tempie uszkodzania taśm w kopalni węgla kamiennego i węgla brunatnego. Warunki pracy w obu przypadkach są wprawdzie różne (w kopalni odkrywkowej przenośniki transportowały nadkład), jednak na mniejszą ilość uszkodzeń w kopalni węgla kamiennego wpływ może mieć też poziom obsługi. Przenośnik w kopalni podziemnej, jako kluczowy dla zapewnienia ciągłości pracy całej kopalni, jest pod szczególnym nadzorem obsługujących go osób i wszelkie uszkodzenia (nawet drobne) są od razu naprawiane. Zapobiega to rozwojowi uszkodzeń i penetracji wody wzdłuż linek. Tak szybkich napraw taśm nie dokonywano w kopalni odkrywkowej.

LITERATURA

- BŁAŻEJ R., 2014. *A high-resolution system for automatic diagnosing the condition of the core of conveyor belts with steel cords*. XIII International Technical Systems Degradation Conference, TSD, Liptovský Mikuláš, 23-26 April, Warszawa: Polskie Naukowo-Techniczne Towarzystwo Eksploatacyjne, cop. s. 61-65.
- BŁAŻEJ R., JURDZIAK L., ZIMROZ R., HARDYGÓRA M., KAWALEC W., 2012. *Inteligentny system do automatycznego badania i ciągłej diagnozy stanu taśm przenośnikowych – cele i założenia projektu badawczego*. Transport Przemysłowy i Maszyny Robocze, nr 4, s. 10-16.

- BŁAŻEJ R., ZIMROZ R., NOWAK R., GRZYB K., KURP L. (2010). *Rozbudowa funkcjonalności systemu EyeQ do diagnostyki rdzenia taśm typu ST*. Transport Przemysłowy i Maszyny Robocze 2010, nr 3, s. 24-28.
- DOMAŃSKI A. 2014. *Ocena efektywności diagnostyki rdzenia taśm przenośnikowych na podstawie zmodernizowanego systemu EyeQ*. Politechnika Wrocławska (praca mgr niepub.).
- JURDZIAK L., 1988. *Określenie wpływu długości przenośnika na trwałość taśm przenośnikowych w kopalni podziemnej*. Prace Naukowe Instytutu Górnictwa P.Wr. Nr 50, Seria: Konferencje Nr 11, Podstawowe Problemy Transportu Kopalnianego, Wrocław.
- JURDZIAK L.; BŁAŻEJ R., 2014. *Oszacowanie kosztów wymian taśm w kopalni podziemnej z uwzględnieniem konsekwencji awarii taśm i wdrożenia urządzeń prewencyjnych*. Materiały konferencyjne XIII Szkoły Eksploatacji Podziemnej (dok.elekt.), Kraków, 24–28.02.2014 / Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk. Kraków: 2014. s. 1-11.
- ŻUR T., 1975. *Metoda obliczania trwałości taśm przenośnikowych*, Górnictwo Odkrywkowe 1975, nr 1.
- ŻUR T., 1980. *Przenośniki taśmowe stosowane w górnictwie*, "Śląsk", Katowice 1980.
- ŻUR T., 1983. *Die Grundlagen einer Berechnungsmethode zur Bestimmung der Lebensdauer von Fördergurten*, Neue Bergbautechnik 13 Jg., Heft 9, Sept. 1983, p. 513-515.

Projekt realizowany w ramach Programu Badań Stosowanych w ścieżce A pt: Inteligentny system do automatycznego badania i ciągłej diagnozy stanu taśm przenośnikowych"

FORECASTS OF ST BELTS CORE CONDITION CHANGES BASED ON BELT SECTIONS WORKING TIME AND THE CONVEYOR LENGTH

The paper presents the first results of steel cord condition diagnosis of conveyor belts according to working time of belt sections and the length of the conveyor. Steel cord condition of belt loops were investigated by 2 magnetic scanners: HRDS (modified EyeQ system) and the LRM scanner developed by servicing firm. In the first case the belts in one of lignite mines were examined, and in the second case the belt loop in one of hard coal mines. Number of damages per 1 meter of belts were investigated. The regression curves for the rate of cord damages over time were selected. Given the demonstrated impact of the length of the conveyor length onto the accumulated energy within one belt loop cycle around conveyor (prof. T.Żur's belt wear model) the effect of these factors on the rate of belt damages increase a special 2 variables non-linear regression function was chosen. These are the first quantitative results of such research in Poland. The belief that over time the rate of appearance of defects increases was proven and may allow on forecasts of belt replacements time.