



Zeszyty Naukowe

Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią
Polskiej Akademii Nauk

rok 2017, nr 99, s. 71–88

Mirosław BAJDA*, Ryszard BŁAŻEJ*, Leszek JURDZIAK**, Monika HARDYGÓRA***

Wpływ różnic trwałości połączeń wulkanizowanych i klejonych na koszty eksploatacji taśm przenośnikowych w kopalni podziemnej

Streszczenie: Wytrzymałość połączeń taśm przenośnikowych wykonywanych w kopalniach rzadko osiąga pełną wytrzymałość taśmy. Składa się na to wiele czynników. Podstawowym jest metoda ich wykonania oraz właściwy dobór składników. Istotny wpływ ma też, jakość wykonania obejmująca zarówno dotrzymanie odpowiedniej geometrii dopasowanej do budowy taśmy i warunków jej pracy, jak i przestrzeganie dobrych praktyk w zakresie technologii ich wykonania. Trudne warunki w kopalniach podziemnych i presja redukcji czasu postoju przenośników (unikanie strat produkcji) odbija się na spadku wytrzymałości statycznej i dynamicznej połączeń. Potwierdzają to liczne badania ich wytrzymałości i trwałości zmęczeniowej prowadzone w Laboratorium Transportu Taśmowego (LTT) w ramach prac badawczych i ekspertyz zleczanych przez producentów taśm i ich użytkowników. Konsekwencją zbyt niskiej wytrzymałości połączeń jest niewielka ich trwałość, spadek niezawodności i w konsekwencji wzrost kosztów transportu. Połączenia taśm stanowią bowiem najsłabsze ogniwo w szeregowej strukturze, jaką tworzą zamknięte pętle połączonych ze sobą odcinków taśm pracujących w ciągach przenośników transportujących urobek w kopalni. W artykule przedstawiono wyniki analiz symulacyjnych pozwalających zbadać jak wzrost trwałości połączeń może przyczynić się do redukcji kosztów transportu w kopalniach podziemnych.

Słowa kluczowe: wytrzymałość połączeń, badania zmęczeniowe, połączenia klejone, połączenia wulkanizowane

Impact of differences in durability of vulcanized and adhesive joints on the operating costs of conveyor belts in underground mines

Abstract: The strength of conveyor belts splices made in mines rarely reaches full belt strength. It consists of a number of factors. The primary is the method of their construction and proper selection of ingredients. The significant impact has also has splice quality covering both keeping proper geometry matched to the belt construction and belts working conditions and adherence to the best practices in the field of technologies of their construction.

* Dr inż., ** Dr hab. inż., *** Prof., Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii, Politechnika Wroclawska, Wrocław;
e-mail: miroslaw.bajda@pwr.edu.pl; ryszard.blazej@pwr.edu.pl; leszek.jurdziak@pwr.edu.pl;
monika.hardygora@pwr.edu.pl

Difficult conditions in underground mines and pressure on reducing conveyor downtime (avoiding production losses) is reflected by a drop in static and dynamic splices strength. This is confirmed by numerous studies of belt splices strength and fatigue life conducted in the Laboratory of Belt Conveying (LTT) within the framework of research and expert opinions commissioned by belt manufacturers and their users. The consequence of too insufficiently low belt splices strength is their low durability, decreasing reliability and, consequently, higher mining transportation costs. Belt splices are in fact the weakest link in the serial structure which form closed loops of interconnected belt sections working in series of conveyors transporting excavated material in the mine. The article presents the results of simulation analyzes analyses investigating how the increase of belt splices durability may contribute to the reduction of transportation costs in the underground mines.

Keywords: splices strength, fatigue tests, adhesive joints, vulcanized splices

1. Trwałość taśm przenośnikowych najważniejszym kryterium ich wyboru

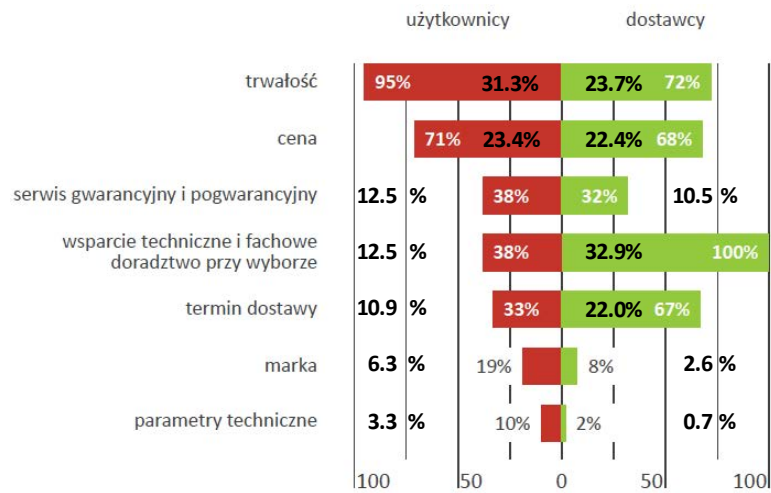
Użytkownicy taśm od lat zwracają uwagę na prawidłowy dobór taśm do warunków pracy. Za najważniejsze kryterium podczas jej wyboru uznawana jest jej trwałość. Potwierdzają to ankiety przeprowadzone przez czasopismo *Inżynieria i Utrzymanie Ruchu* (Abramczyk 2015, 2016) oraz wyniki badań przeprowadzonych na Politechnice Wrocławskiej (Jurdiak i Szlichciński 2002).

W najnowszym raporcie „Przenośniki i pasy” z 31 maja 2016 roku pokazano, że użytkownicy za najważniejsze kryterium brane pod uwagę podczas wyboru taśm przenośnikowych oraz pasów uznali trwałość (95% bezwzględny udział; 31,3% względny udział), cenę (71%; 23,4%), serwis gwarancyjny i pogwarancyjny oraz wsparcie techniczne i fachowe doradztwo przy wyborze (po 38%; 12,5%) i termin dostawy (33%; 10,9%). Według dostawców przy wyborze klienci najczęściej kierują się: wsparciem technicznym i fachowym doradztwem (100%; 32,9%), trwałością (72%; 23,7%), ceną (68%; 22,4%) i terminem dostawy (67%; 22,6%). Główne kryteria wyboru pokazano w postaci „diagramu tornado” (rys. 1).

We wcześniejszej ankiecie poświęconej wyłącznie doborowi taśm (2015) użytkownicy również wskazali na trwałość (23%) i cenę (20%), jednak za ważne kryterium uznali również wytrzymałość taśmy (17%) i pozytywną współpracę z producentem i dostawcą (16%) oraz markę i bliskość siedziby producenta (po 7%) oraz gwarancję (5%), jako najmniej istotną. Odpowiedzi „inne” (3%) to m.in.: energooszczędność, współczynnik tarcia oraz serwis.

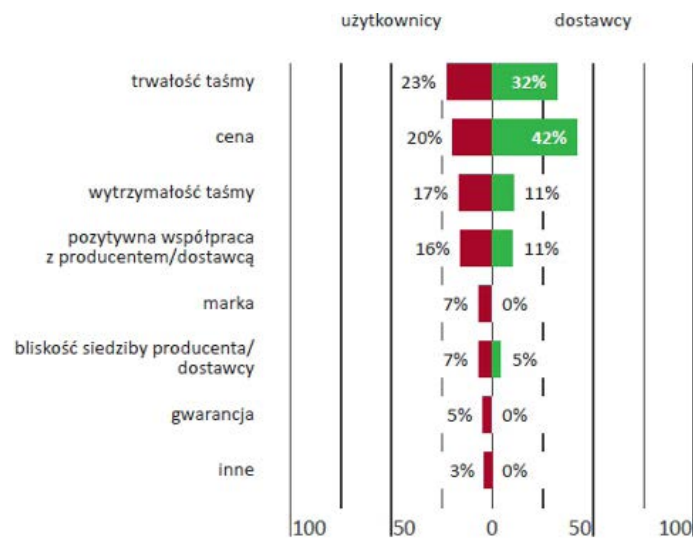
W celu porównania wyników ankiet (rys. 1 i 2) wyniki względne (sumujące się do 100%) z ankiety z 2015 r. porównano z przeliczonymi odpowiedziami z ankiety z roku 2016, która pozwalała na wskazanie wielu kryteriów jednocześnie. Obliczone względne udziały podano w nawiasach na drugim miejscu oraz zaznaczono tłustą czarną czcionką (rys. 1).

Właściwy dobór taśm przekłada się na jej trwałość – cechę, która została uznana przez użytkowników za najważniejszą przy wyborze taśmy (rys. 2). W dalszej kolejności zostały wymienione: cena, wytrzymałość taśmy, pozytywna współpraca z producentem/dostawcą, marka, bliskość siedziby producenta/dostawcy oraz gwarancja. Wśród odpowiedzi „inne” pojawiły się m.in.: energooszczędność, współczynnik tarcia powierzchni taśmy oraz serwis.



Rys. 1. Główne kryteria brane pod uwagę podczas zakupu przenośników i pasów przez klientów według sondowanych użytkowników i dostawców (Abramczyk 2016)

Fig. 1. Key criteria taken into account when purchasing conveyors and belts by customers according to poll of their users and suppliers



Rys. 2. Kryteria brane pod uwagę przy wyborze taśmy przenośnikowej (Abramczyk 2015)

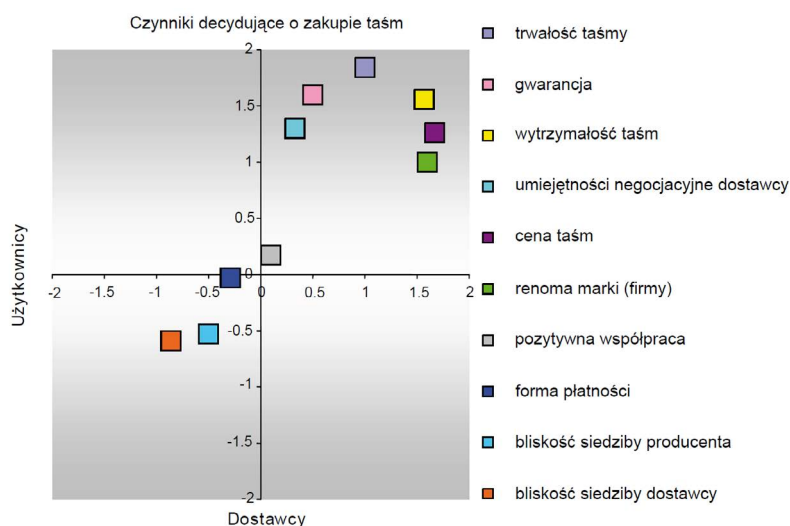
Fig. 2. Criteria taken into account when purchasing conveyor belts

Cztery z najwyżej ocenianych przez użytkowników czynników zostały uznane za najważniejsze również przez dostawców. Na pierwszym miejscu znalazła się jednak nie trwałość taśmy (32%), lecz jej cena (42%). Warto podkreślić, że w opinii dostawców marka i gwarancja (po 0%) nie wpływają w żaden sposób na decyzję zakupową klientów.

Inny sposób badania wybrano w ankiecie przeprowadzonej na Politechnice Wrocławskiej. Użytkownicy taśm i jej dostawcy przypisali wagi poszczególnym kryteriom decydującym o zakupie w zakresie od cech nieistotnych (-2), po bardzo ważne (+2), poprzez mało ważne (+1), średnie (0) i ważne (+1). Wyniki z hierarchią ważności poszczególnych czynników zaprezentowano na wykresie XY, na którym na osi X oznaczono wagi przypisane przez dostawców taśm, a na osi Y wagi wskazane przez użytkowników taśm. Cechy, które znalazły się na lub w pobliżu prostej $y = x$ były podobnie ocenione przez użytkowników i dostawców.

Dla użytkowników najważniejsza była trwałość (średnia 1,84), gwarancja (1,6) i wytrzymałość (1,56), a dla dostawców cena (1,67), renoma marki (1,6) i wytrzymałość taśmy (1,57). Dodatkowo przebadano grupę osób z otoczenia (uczelnie, instytuty badawcze, specjaliści, projektanci itp.). Dla osób z tej grupy najważniejsza była wytrzymałość (2), cena (1,33) i trwałość (1,3). Jedynie dostawcy nie wskazali trwałości, jako jednej z trzech najważniejszych cech. W późniejszych ankietach trwałość i w tej grupie znalazła się na drugim miejscu, co pokazuje, że z czasem nauczyli się lepiej rozpoznawać potrzeby klientów.

Nowe ankiety pokazują też, że większego znaczenia dla użytkowników nabrała cena, którą za najważniejszą uznają dostawcy. Powoduje to ostrzejszą konkurencję cenową. Inaczej postrzegana jest gwarancja – ważniejsza dla klientów niż dostawców, choć też jest doceniana.



Rys. 3. Hierarchia ważności czynników decydujących o zakupie taśm przenośnikowych według ich użytkowników i dostawców (Jurdiak i Szlichciński 2002)

Fig. 3. The importance hierarchy of factors determining conveyor belts purchases according to their users and suppliers

Najważniejszym przesłaniem ankiet jest znaczenie trwałości taśm docenianej przez wszystkie grupy. Wraz z ceną zakupu przekłada się ona na koszty eksploatacji transportu przenośnikami taśmowymi. Zwrócono na to uwagę w pracach (Jurdziak 1998, 1999).

Należy mieć świadomość, że niższa cena taśmy oznacza zazwyczaj bardziej kosztowną eksploatację (więcej obsługa i napraw) i niższą trwałość, co przekłada się na częstszą konieczność wymian taśm. Ze względu na to, że awarie wiążą się z przestojami w produkcji i związanymi z nimi stratami (czasami bardzo wysokimi), cena nie powinna być jedynym kryterium wpływającym na wybór produktu. Niestety, pomimo świadomości wagi trwałości w wielu przetargach cena odgrywa główną rolę, gdyż trwałość nie jest łatwo ocenić *a priori*. Rzadko zleca się badania zmęczeniowe, które ułatwiłyby wybór pomiędzy różnymi ofertami. Producenci przekonani o wysokiej trwałości swoich taśm mogą zaoferować dłuższe okresy gwarancyjne niż konkurenci. Niestety, gwarancje nie są specjalnie doceniane przez dostawców, gdyż mogą pociągać za sobą wysokie koszty w przyszłości, gdy faktyczna trwałość okaże się niższa niż gwarantowana. Wysoka trwałość ma swoją cenę. Można ją osiągnąć stosując komponenty wysokiej jakości oraz prowadząc liczne badania nad doskonaleniem konstrukcji i materiałów, a to oznacza wyższe koszty produktów końcowych. Trudno przekonać odbiorców, że wyższa cena przekłada się na wyższą trwałość rekompensującą wydatek, gdy brak jest rzetelnych badań porównawczych. Pojedyncze przypadki nie są miarodajne, gdyż trwałość jest cechą probabilistyczną, a do wykazania istotności statystycznej (np. wyższej trwałości) potrzeba odpowiednio dużej liczby danych.

2. Połączenia taśm – najsłabsze ogniwo pętli taśm na przenośniku

Niedocenianym elementem składowym przenośnika taśmowego są złącza odcinków taśm, pozwalające połączyć krótsze odcinki taśm w zamkniętą pętlę o długości odpowiedniej dla danego urządzenia.

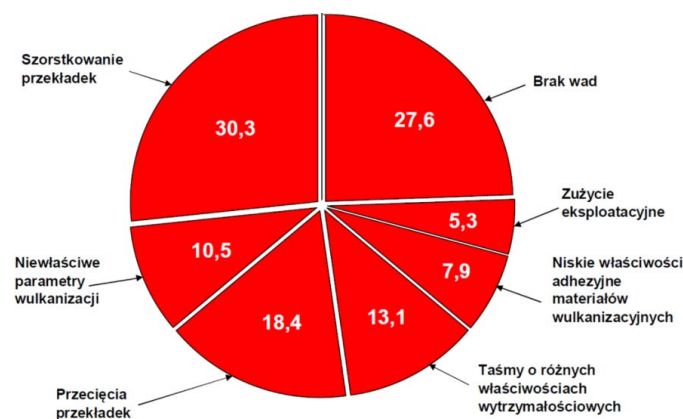
W podziemnych kopalniach węgla kamiennego długość odcinków jest ograniczona rozmiarami wyrobisk oraz szybu transportowego. Zwinięta taśma zajmuje określoną przestrzeń i dlatego zazwyczaj nie da się dostarczyć taśm na miejsce instalacji w odcinkach dłuższych niż 150 m. W kopalniach odkrywkowych jest to możliwe. Projektuje się specjalne podwójne szpule, pozwalające zmieścić ciągłe odcinki taśm bez połączeń o długości większej niż 700 metrów. Przy tak długich odcinkach waga szpul i ich rozmiar wraz z taśmą sprawiają trudność w transporcie naziemnym po drogach publicznych od producenta do miejsca instalacji. Wysiłek się jednak opłaca, bo dzięki temu w pętli jest bardzo mało połączeń.

Dążenie do wydłużania odcinków taśm w pętli do granic technicznych możliwości wiąże się z faktem, że połączenia w pętli taśmy stanowią najsłabsze ogniwo. Im mniejsza ich liczba tym wyższa jest niezawodność pętli. Stanowią one układ szeregowy odcinków i połączeń z punktu widzenia niezawodności, a wytrzymałość połączeń taśm przenośnikowych wykonywanych w kopalniach rzadko osiąga pełną wytrzymałość nowej taśmy. Połączenia są więc najsłabsze i tam najczęściej dochodzi do zerwania ciągłości pętli. Aby temu zapobiec proponowane są różnorodne metody monitorowania połączeń w trakcie inspekcji stanu pętli taśm (odcinków i połączeń) dokonywanej przez specjalnie powołaną obsługę lub komputerową

analizę cyfrowego obrazu (Bancroft i in. 2003; US Dep. of Energy 2004; Błażej i Jurdzia 2013; Błażej i in. 2012, 2013). Wdrożono też możliwość monitorowania zmian długości połączeń poprzez analizę odstępów między magnesami (Mazurkiewicz 2005, 2006). Trwają też prace na automatyzacją oceny połączeń w systemach magnetycznych (Błażej i in. 2015).

Na zmniejszoną wytrzymałość połączeń składa się wiele czynników (Bajda i in. 2016; Ambrisko i in. 2016), które użytkownicy powinni badać w akredytowanych laboratoriach by wytrzymałość zwiększyć (Hardygóra i in. 2015). Podstawowymi czynnikami są: metoda ich wykonania oraz właściwy dobór składników mających decydujący wpływ na trwałość zmęczeniową połączeń (Hardygóra i in. 2012). Istotny wpływ ma też jakość wykonania, obejmująca zarówno dotrzymanie odpowiedniej geometrii połączeń dopasowanej do budowy taśmy i warunków jej pracy, jak i przestrzeganie dobrych praktyk w zakresie technologii ich wykonania. Trudne warunki w kopalniach podziemnych i presja redukcji czasu postoju przenośników (unikanie strat produkcji) odbija się na spadku wytrzymałości statycznej i dynamicznej połączeń. Potwierdzają to liczne badania ich wytrzymałości i trwałości zmęczeniowej prowadzone w Laboratorium Transportu Taśmowego (LTT) w ramach prac badawczych i ekspertyz zleczanych przez producentów taśm i ich użytkowników. Prace prowadzone są od ponad 15 lat (Błażej i in. 2002; Błażej i Hardygóra 2003) i do tej pory wykonano badania ponad 300 złączy taśmowych dla kilkunastu firm krajowych i zagranicznych m.in. Matador, Phoenix, Dunlop, Depreux, Cobra Polska, Nilos Polska, Sempertrans, Conbelts, FTT Wolbrom, Remagum i inne. Na podstawie wykonanych badań stwierdzano przyczyny obniżonej wytrzymałości połączeń wynikające z wad wykonawczych i materiałowych (rys. 4).

Okazało się, że w 27,6% złączy nie stwierdzono występowania wad, a pomimo to złącza miały obniżoną wytrzymałość. Ponadto przyczyną obniżonej wytrzymałości 13,1% złączy było łączenie ze sobą taśm o różnych właściwościach wytrzymałościowych. Wyniki tych badań były impulsem do dalszych bardziej szczegółowych prac dotyczących badań



Rys. 4. Procentowy udział przyczyn powodujących obniżenie wytrzymałości złączy taśm wieloprzekładowych (Projekt NCBiR 2015)

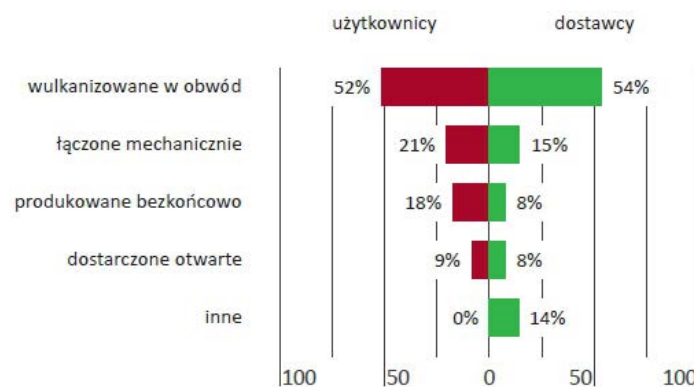
Fig. 4. Percentage shares of factors causing the lowering of the strength of multiplies belt joints

wielkości i rozkładu naprężeń w spoinach złączy, w tym m.in w ramach projektu pt. *Złącza wieloprzekładowych taśm przenośnikowych o zwiększonej trwałości eksploatacyjnej* (Projekt NCBiR 2015). Zasadniczym jego celem jest zmniejszenie awaryjności złączy wykonywanych metodą klejenia na zimno, zwiększenia ich trwałości oraz obniżenie ich kosztu poprzez zidentyfikowanie tych właściwości taśm przenośnikowych i materiałów do ich łączenia, które istotnie wpływają na wielkość naprężeń w spoinie klejowej złączy oraz na ich trwałość zmęczeniową.

We wspomnianej wcześniej ankiecie (Abramczyk 2015) spytano użytkowników i dostawców o najchętniej wybierane typy łączenia taśm (rys. 5).

Od rodzaju rdzenia taśmy i materiałów, z których jest ona wykonana, zależy wybór odpowiedniej konstrukcji, materiałów oraz technologii wykonania złącza. Przykładowo, taśmy tkaninowo-gumowe łączy się, stosując metodę wulkanizacji, klejenia lub połączenia mechaniczne (haki pojedyncze lub podwójne, połączenia zawiasowe klamrowe, zawiasowe złączkowe itd.). Te ostatnie stosuje się najczęściej w przenośnikach wymagających rozłączania taśmy lub w sytuacjach, w których konieczne jest wykonanie szybkiego, tymczasowego połączenia odcinków taśmy (np. w czasie awarii). Połączenia te sprawdzają się w przypadku taśm o niskiej i średniej wytrzymałości na rozciąganie oraz o małej szerokości. Połączenia te nie są analizowane w pracy z uwagi na ich tymczasowy charakter. Koszty tych połączeń są dużo niższe, ale niższa jest ich trwałość. Brak danych nie pozwolił jednak na ich analizę.

Wysoką wytrzymałość połączeń można osiągnąć dzięki zastosowaniu takich metod łączenia, jak wulkanizacja (stosowana zazwyczaj przy pierwszej instalacji nowych taśm przenośnikowych) lub klejenie. Metodę wulkanizacji stosuje się do wszystkich rodzajów taśm. Co istotne, w przypadku taśm z linkami stalowymi wulkanizacja jest jedyną dopuszczalną metodą łączenia (Abramczyk 2015). Wykonanie złącza wulkanizowanego wymaga zastosowania specjalistycznej prasy wulkanizacyjnej oraz materiałów wulkanizacyjnych i powinno być dokonane przez wyspecjalizowaną ekipę serwisową. Na rynku tego typu usług jest kilka firm, w tym ekipy serwisowe producentów taśm, co zaostrza konkurencję. Ten typ połączeń preferuje 52% użytkowników i 54% dostawców (rys. 5).



Rys. 5. Preferowane typy łączenia taśm (Abramczyk 2015)

Fig. 5. Preferred types of belts splices

Obie sondowane grupy na drugim miejscu wskazały połączenia mechaniczne (21% użytkowników taśm oraz 15% dostawców). Trzecie miejsce – według użytkowników – zajmują taśmy produkowane bezkońcowo, a w opinii dostawców – inne rozwiązania (14% taśmy łączone metodą klejenia na zimno) (Abramczyk 2015). Klejenie odcinków taśm przenośnikowych metodą tzw. *wulkanizacji na zimno*, podobnie jak ich wulkanizacja, zachowuje szczelność taśmy i złącze może współpracować ze skrobakami czyszczącymi. Czas potrzebny do uzyskania całkowitej wytrzymałości przez klej to zazwyczaj 24 godziny (Abramczyk 2015). Podobny czas powinny być pozostawione złącza wulkanizowane. W pracy założono jednakowe postoje dla obu rodzajów złącza i jednakowe straty postojowe. Rozważono też wariant, w którym czas postoju połączeń klejonych jest 3-krotnie krótszy.

Realia ruchowe czasami odbiegają od idealnych warunków. Presja przywrócenia produkcji i transportu powoduje, że zarówno połączenia wulkanizowane, jak i klejone szybciej poddawane są obciążeniom i już po jednej zmianie postojowej przenośniki z wymienioną taśmą lub złączem są uruchamiane. Odbija się to na spadku wytrzymałości i trwałości połączeń, bo procesy sieciowania w gumie nie zostały zakończone. W konsekwencji prowadzi to do wzrostu kosztów transportu i strat awaryjnych, bo oszczędności z wcześniejszego podjęcia pracy są jedynie chwilowe, a w długim okresie koszty rosną z uwagi na częstsze wymiany planowe i awaryjne.

3. Porównanie kosztów wykonywania połączeń wulkanizowanych i klejonych

Konsekwencją zbyt niskiej wytrzymałości połączeń jest niewielka ich trwałość, spadek niezawodności i w konsekwencji wzrost kosztów transportu. Połączenia taśm stanowią najsłabsze ogniwo w szeregowej strukturze, jaką tworzą zamknięte pętle połączonych ze sobą odcinków taśm pracujących w ciągach przenośników transportujących urobek w kopalni.

W dalszej części przedstawiono wyniki szacunkowych analiz ekonomicznych, pozwalających zbadać wrażliwość kosztów wymian i połączeń taśm na zmianę niektórych parametrów, m.in wpływ wzrostu trwałości połączeń na redukcję kosztów transportu w kopalniach podziemnych.

3.1. Przyjęte założenia

W celu przeanalizowania wpływu trwałości połączeń klejonych na koszty transportu przyjęto pewne założenia wyjściowe o łącznej długości taśm w hipotetycznej kopalni. Założono, że w kopalni zainstalowanych jest 10 km taśm, czyli przenośniki mają około 5 km długości. Przyjęto, że średnia długość pojedynczego odcinka w pętlach wynosi 100 m. Założenie to warunkuje liczbę połączeń. W miarę starzenia się taśm i ich zużywania oraz pojawiania się uszkodzeń obsługa wymienia uszkodzone fragmenty taśm, zwiększając liczbę odcinków i połączeń. Dla liczby odcinków i połączeń nie jest bez znaczenia, w którym miejscu wstawia się taśmę. Jeśli wymieniamy fragment odcinka taśmy na brzegu z wymianą

złącza starego na nowe to powstaje tylko jeden dodatkowy odcinek i jedno dodatkowe złącze. Wymiana fragmentu taśmy na środku odcinka zwiększa liczbę połączeń o dwa nowe, a liczba odcinków wzrasta do trzech (w miejscu jednego). Sposób prowadzenia wymian fragmentów taśm (minimalna długość wstawianej taśmy i sposób wymian) nie pozostaje bez wpływu na niezawodność pętli (Błażej i in. 2015 i 2016). W tej pracy aspekt niezawodności nie będzie analizowany, a rosnąca liczba odcinków zostanie uwzględniona poprzez badanie wpływu długości średniego odcinka na koszty wymian taśm i połączeń. Widać, że wymiany fragmentów taśm prowadzą do wzrostu liczby połączeń, spadku średniej długości odcinków oraz wzrostu kosztów, co będzie dalej wykazane.

Przyjęto, że koszt zakupu taśm tekstylnych wynosi około 300 zł/m.b., a koszty wykonania połączeń to dla połączenia wulkanizowanego 2800 zł, a dla połączenia klejonego 1800 zł. Założono średnią trwałość taśmy na poziomie trzech lat i nie mniejszą trwałość połączeń wulkanizowanych, które osiągają 100% wytrzymałości taśmy. Oznacza to, że złącza wulkanizowane wymienia się jedynie przy okazji wymiany taśmy i nie pojawia się konieczność ich wymiany na skutek pogorszenia ich kondycji. Przy 100 połączeniach i ich trwałości nie mniejszej niż trzy lata, rocznie będzie się wymieniać około 34 połączenia wulkanizowane.

Połączenia klejone taśm tekstylnych mają mniejszą wytrzymałość (do 60% wytrzymałości taśmy) i przez to ich trwałość założono na poziomie jednego roku. Oznacza to, że rocznie wymieniać się będzie 100 połączeń, a więc tyle ile ich jest w kopalni.

W analizie uwzględniono dodatkowe koszty postojowe, jednak nie na poziomie przyjętym w USA. W amerykańskich podziemnych kopalniach węgla kamiennego oszacowano straty postojowe związane z naprawą pętli taśm na \$ 240 000, czyli około \$ 1000 na minutę. Średnią długość naprawy oszacowano na 4 godziny. Tak wysokie straty z tytułu postojów awaryjnych w okresie wzmożonego popytu na węgiel były przyczyną opracowania systemu wizyjnego do monitorowania stanu połączeń i taśmy w celu ich zapobiegania (US Dep. of Energy 2004).

Wielkości kosztów postojów i strat nie jest łatwo oszacować, gdyż zależą one od położenia przenośnika, który uległ awarii. Większe straty będą powodowane postojem przenośników odstawy głównej, a mniejsze postojem przenośników oddziałowych. Postoje planowe mogą nie generować żadnych strat, gdy realizowane są w okresie nieprodukcyjnym (np. w weekendy lub na zmianach nieroboczych). Postoje awaryjne mogą wiązać się nie tylko ze stratami produkcyjnymi (brak wydobycia w okresie postoju), których przykładowo nie da się nadrobić, bo kopalnia ma w pełni wykorzystane moce produkcyjne, lecz również z kosztami usuwania skutków awarii np. związanymi z usunięciem rozsypanego urobku, naprawy uszkodzonej trasy, wymiany uszkodzonej taśmy. Z uwagi na brak danych o liczbie postojów awaryjnych w polskich kopalniach założono, że analizowane są tylko dodatkowe koszty postoju przypadające na każdą wymianę połączenia. Analizowano ich poziom od zera do 20 tys. zł na wymianę, a użytkownicy będą mogli wybrać poziom odpowiadający ich indywidualnym warunkom.

Dodatkowe koszty postojów rozważono w dwóch wariantach. W jednym obie strategie łączenia metodą wulkanizowania i łączenia taśm przy użyciu klejów (wulkanizacji na zimno) zajmują tyle samo czasu i generują te same dodatkowe koszty postojowe. W drugim wariantcie czas realizacja połączenia klejonego jest trzy razy krótszy i przez to koszty te są trzy razy mniejsze.

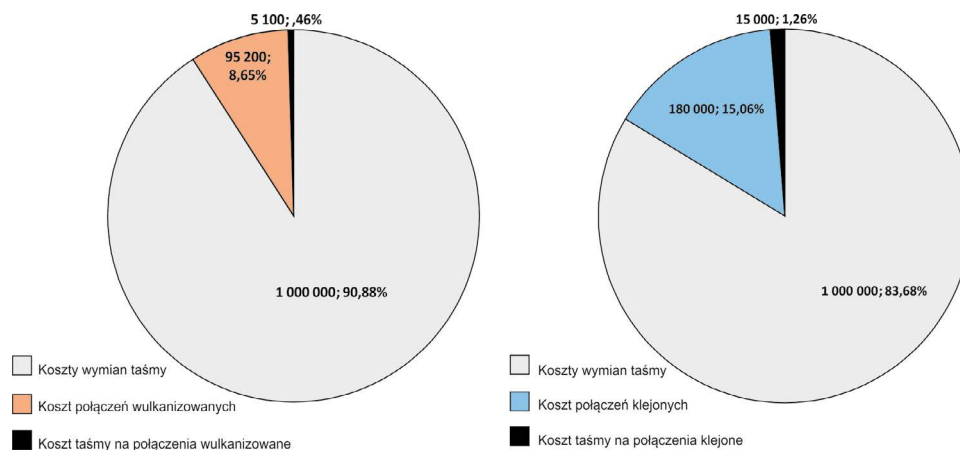
Koszty związane z postojem przenośnika mogą być potraktowane jako koszty związane z wymianami taśm i połączeń, występujące po stronie kopalni. Zwykle połączenia wykonywane są przez zewnętrzne firmy usługowe serwisujące taśmy. Nie oznacza to, że kopalnia nie ponosi żadnych kosztów własnych z tym związanych, np. kosztów wykonania dodatkowych czynności przygotowawczych i pomocniczych (np. przewinięcie pętli by połączenie znalazło się w miejscu dogodnym do jego wykonania, oczyszczenie trasy, nadzór nad realizacją połączenia) oraz odbioru wykonanych połączeń. Konieczne może więc być skierowanie do tych prac zarówno ludzi jak i sprzętu pomocniczego, co wiąże się z dodatkowymi kosztami.

3.2. Szacunkowe wyniki

Dla przyjętych założeń okazało się, że roczne koszty wymian taśm i wykonywania połączeń w obu strategiach przekraczają 1 mln zł. Wulkanizacja jest tańsza niż klejenie o 94 700 zł rocznie. Jej koszt to 1,1 mln zł, podczas gdy koszt klejenia wynosi 1,195 mln zł.

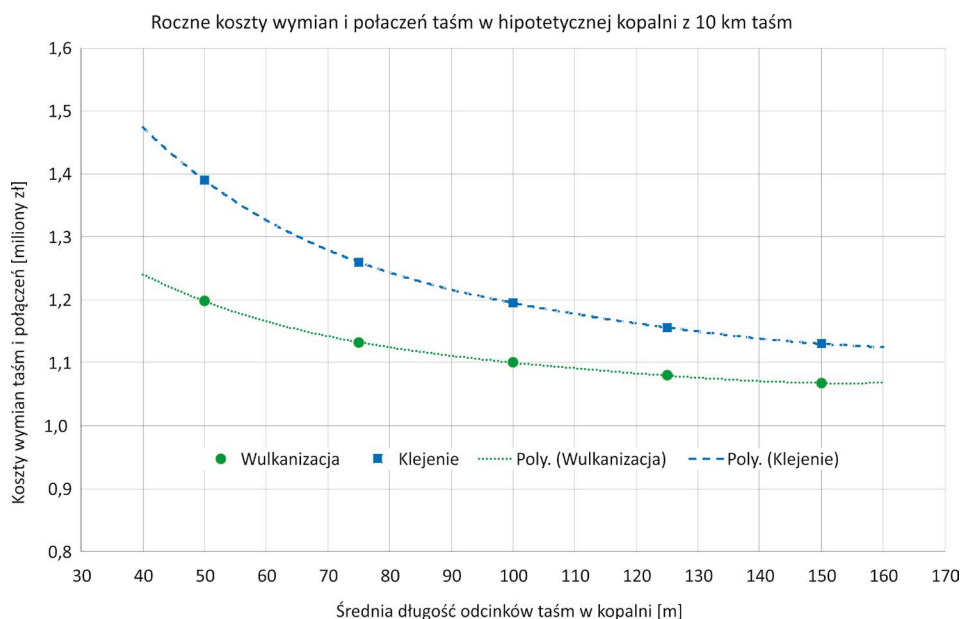
Największy udział w tych kosztach miały wymiany taśm (90,88% i 83,66% odpowiednio). Roczny koszt połączeń wulkanizowanych wyniósł 95 200 zł, co stanowiło 8,65% łącznych kosztów. W strategii połączeń klejonych roczne koszty połączeń wyniosły 180 000 zł, co stanowiło 15,06%. Do kosztów doliczono straty taśmy związane z realizacją połączeń. Przyjęto, że w trakcie każdego połączenia traci się około 1 m taśmy. Ich udział przy wulkanizacji wyniósł 0,46% (5100 zł), a przy klejeniu 1,26% (15 000 zł) (rys. 6).

Przeprowadzono też analizę wrażliwości kosztów na zmianę przyjętych parametrów bazowych. Jednym z nich była średnia długość odcinka taśmy w kopalni wynosząca 100 m. Warunkuje to liczbę połączeń, a przy założonej trwałości połączeń liczbę wymienianych połączeń i koszty. Wpływ tego parametru zobrazowano na rysunku 7. Punkty na wykresie reprezentują obliczone koszty, a linie przerywane reprezentują dobrane linie trendu (funkcje wielomianu stopnia 4).



Rys. 6. Udział kosztów składowych w kosztach wymian taśm i połączeń

Fig. 6. Share of component costs in belts and splices replacement costs

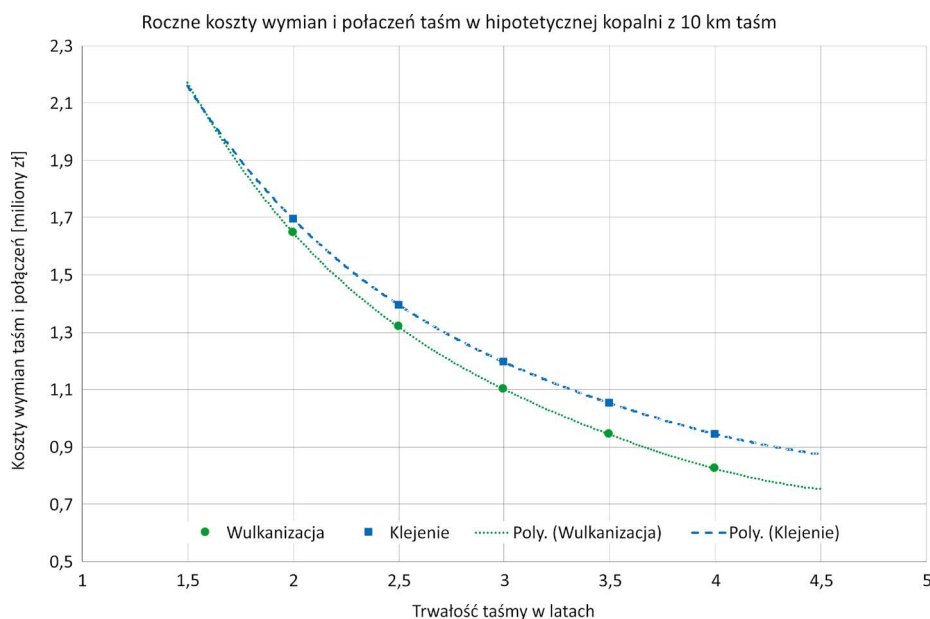


Rys. 7. Wpływ średniej długości odcinków taśm w kopalni na koszty wymian taśm i połączeń

Fig. 7. Impact of belts segment average length in mine on belts and splices replacement costs

Jak widać wpływ ten nie jest bardzo duży, gdyż dla dwukrotnie krótszych odcinków (dwukrotnie większej liczby połączeń) koszt wzrósł w przypadku wulkanizacji o około 97 350 zł, a dla klejenia o 195 000 zł. Procentowe wzrosty wyniosły odpowiednio: 8,85% dla wulkanizacji i 16,32% dla klejenia. Oszczędności ze wzrostu długości odcinków są jeszcze mniejsze. Wzrost długości do 150 m przyniósłby oszczędności rzędu około 3% dla wulkanizacji, a dla klejenia 5,44%. Tak niewielkie zmiany kosztów wynikają z tego, że największy udział w kosztach mają koszty nowej taśmy, a koszt połączeń mieści się w granicach od 8–15%. Podwojenie liczby połączeń podwaja koszty wykonania połączeń w wymiarze bezwzględny, ale w wymiarze procentowym nadal jest to niewielka część łącznych kosztów. Należy jednak pamiętać, że w analizie tej nie uwzględniono kosztów postojów awaryjnych, a te zależą od niezawodności pętli taśm. Ta spada istotnie przy wzroście liczby połączeń klejonych, których trwałość jest trzykrotnie mniejsza od trwałości połączeń wulkanizowanych.

Innym istotnym czynnikiem jest trwałość taśmy, która wpływa na długość wymienianych rocznie taśm i pośrednio warunkuje liczbę połączeń. Koszt taśm ma największy udział w łącznych kosztach wymian taśm i połączeń (84–91%) i dlatego jest on kluczowy (rys. 8). Jak widać jest to najistotniejszy czynnik warunkujący łączne koszty wymian taśm i ich połączeń. Słusznie na to zwracają uwagę w ankietach zarówno użytkownicy jak i dostawcy taśm. Spadek trwałości taśm do około 1,5 roku powoduje, że łączne koszty wymian taśm i połączeń w obu strategiach się zrównują na poziomie dwukrotnie wyższym niż przy trwałości wynoszącej trzy lata. Krótka trwałość taśm zwiększa długość rocznych wymian taśm



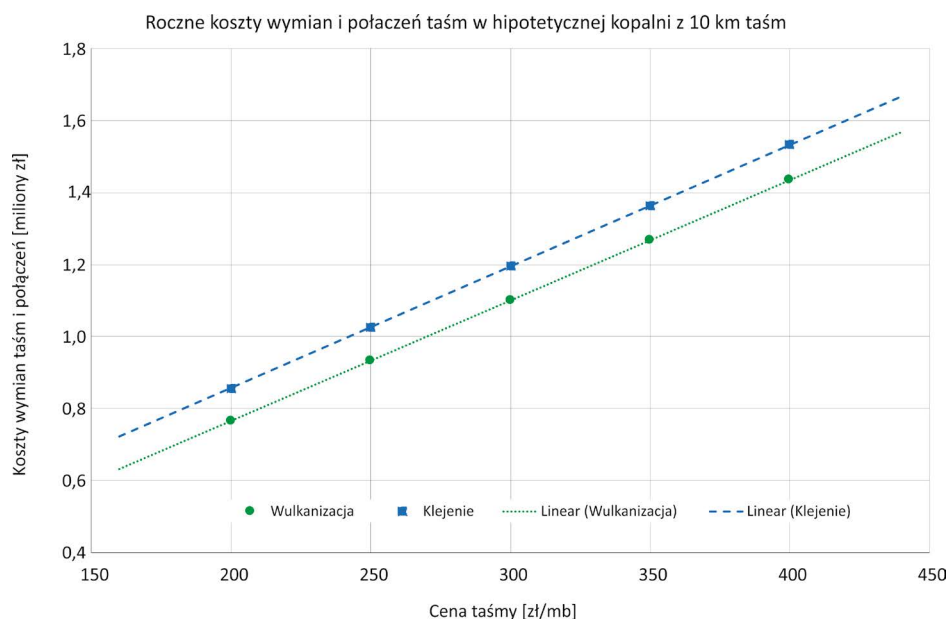
Rys. 8. Wpływ trwałości taśmy na koszty wymian i połączeń taśm przy stosowaniu połączeń wulkanizowanych i klejonych

Fig. 8. The impact of belt durability on the costs of belt and splices replacements for vulcanized and adhesive joints

i liczbę wymienianych połączeń wulkanizowanych, które wymienia się przy okazji wymian taśmy.

Z uwagi na większy koszt połączeń wulkanizowanych niweluje to różnice kosztów w obu strategiach. Obawy o spadek trwałości taśm mogą się pojawić, przy ich zakupie z nieznanego źródła lub wadliwym ich doborze do warunków i zadań transportowych. Dla użytkowników ważniejsze są potencjalne oszczędności jakie można osiągnąć dzięki zwiększeniu trwałości taśm. Jej wzrost do 4 lat powoduje spadek łącznych kosztów wymian taśm i połączeń do poziomu 823 tys. zł, co daje oszczędność 276,6 tys. zł rocznie, a więc o ponad 25% dla taśm wulkanizowanych i o 250 tys. zł (o 20,9%) dla strategii połączeń klejonych. Wzrost trwałości taśm można osiągnąć rezygnując z kryterium ceny na przetargach i łącząc cenę z czasem gwarancji poprawnej pracy taśm. Ryzyko nieosiągnięcia zakładanych oszczędności przerzucone zostanie wtedy na dostawcę taśm, który zaoferował wyższe ceny. Z uwagi na stochastyczny charakter trwałości taśm proponowanym narzędziem do analizy opłacalności gwarancji powinna być symulacja Monte Carlo dopasowana do warunków klienta, gdyż każda sytuacja jest indywidualna z uwagi na warunki pracy taśm i stosowane strategie ich połączeń.

Drugim czynnikiem wskazanym przez odbiorców i dostawców była cena taśmy. Przedstawiono wyniki analizy wrażliwości łącznych rocznych kosztów wymian i połączeń taśm na zmianę ceny od 200 do 400 zł/m (rys. 9). Cena ta nie ma wpływu na łączne koszty w obu strategiach.



Rys. 9. Wpływ cen taśm na łączne, roczne koszty wymian taśm i połączeń

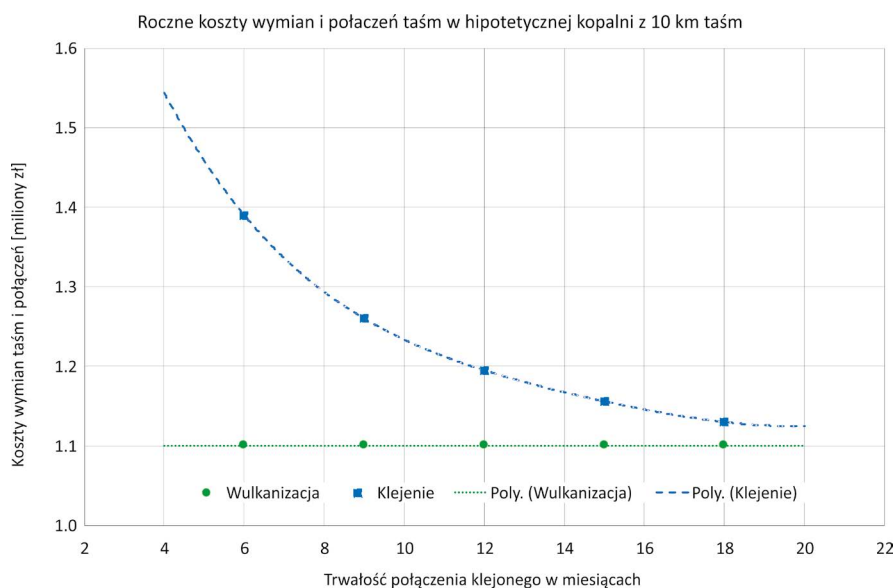
Fig. 9. The impact of belts prices on the total, annual belts and splices replacement costs

Zbadano też wpływ zmian trwałości połączenia klejonego na zmianę łącznych kosztów wymian taśm i połączeń (rys. 10). Okazało się, że wzrost trwałości połączeń klejonych z 12 miesięcy do 18 miesięcy praktycznie zrównuje łączne koszty w obu strategiach.

Niestety, przy zaostrej konkurencji na rynku usług wymian i łączenia taśm, koszt połączenia klejonego pokrywa jedynie koszty krańcowe jego wykonania. Trudno oczekiwać, by rosła trwałość połączeń, gdy maleją płace pracowników wykonujących połączenia. Niskie płace, to wysoka rotacja pracowników i brak doświadczenia. Dodatkowo kopalnie wywierają presję na skracanie czasu bezczynności przenośnika, co nie sprzyja osiągnięciu zakładanej wytrzymałości połączeń. Warto przemyśleć, czy nie warto, podobnie jak dla taśm, w przetargach na realizację usług łączenia taśm połączyć cenę z długością gwarancji poprawnej pracy połączeń. Możliwe, że nieco droższe połączenia, ale wykonane staranniej przez doświadczonych pracowników będą pracować dłużej. Wyższa cena zrekompensowana zostanie użytkownikom oszczędnościami z tytułu wzrostu trwałości połączeń (rys. 10) lub uniknięciem kosztów dzięki gwarancjom, gdy cel wzrostu trwałości połączeń nie zostanie osiągnięty.

Wykonawcy połączeń ryzyko wzrostu kosztów wymian gwarancyjnych może pokryć wyższa cena. Będzie też on bardziej zainteresowany dbałością o jakość połączeń, lepszym doбором materiałów do łączenia i doskonaleniem konstrukcji połączeń by udzielone gwarancje nie zwiększyły jego kosztów pomimo lepszej ceny.

Wzrost ceny połączenia klejonego przekłada się bezpośrednio na wzrost łącznych kosztów wymian i połączeń taśm (rys. 11). Wzrost ceny o 33,(3)% (z 1800 zł do 2400 zł), zwięks-



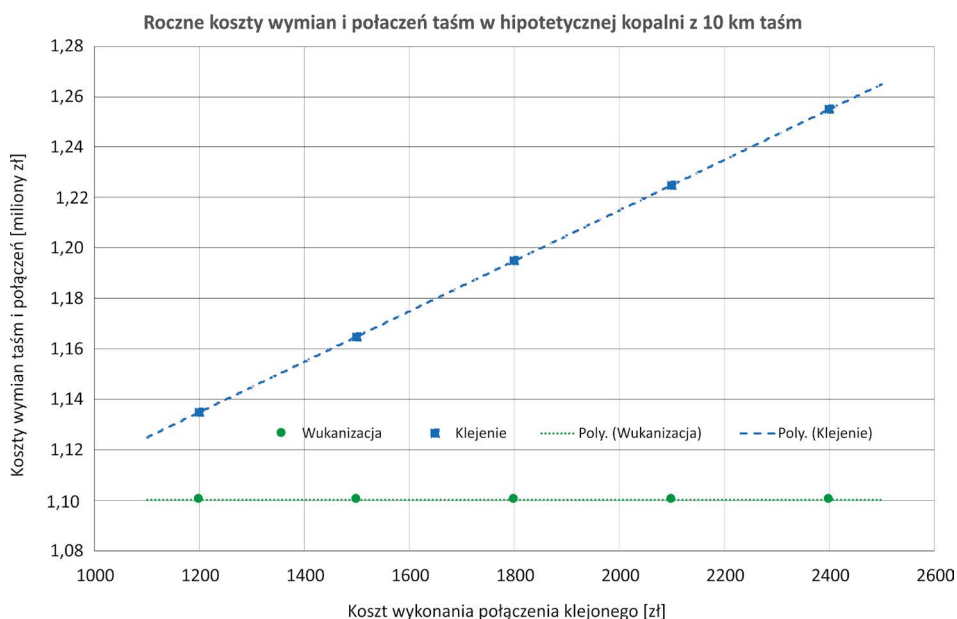
Rys. 10. Wpływ średniej trwałości połączeń klejonych na łączne koszty wymian i połączeń

Fig. 10. Impact of average durability of adhesive belt joints on total belt and splices replacement costs

sza koszty jedynie o 60 000 zł rocznie, a więc o około 5%. Jeśli względnemu wzrostowi kosztów wykonania połączenia klejonego będzie towarzyszyć analogiczny względny wzrost trwałości, to łączne koszty wymian i połączeń taśm dla kopalni nie powinny ulec wzrostowi, a pojawią się korzyści ze wzrostu niezawodności.

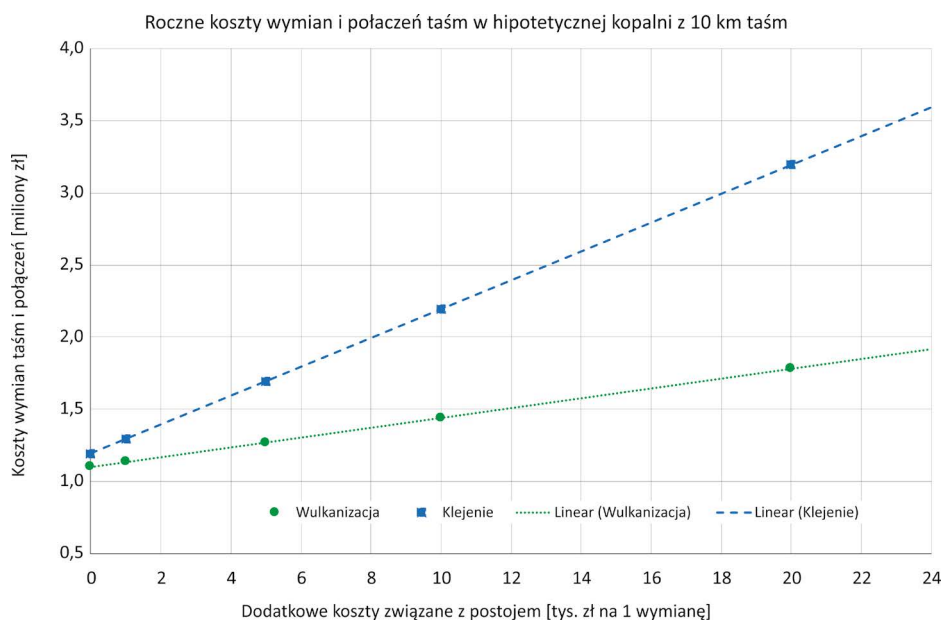
Założono, że dodatkowe koszty wykonania połączeń ponoszone przez kopalnię nie różnią się dla strategii łączenia taśm przy użyciu wulkanizacji i klejenia. Mogą one przedstawiać koszty własne związane z postojem przenośnika, jego przygotowaniem do wymiany połączenia, kosztem asysty i/lub nadzoru oraz użyciem dodatkowego sprzętu (np. kosztów transportu ekipy wymieniającej połączenie na miejsce naprawy). Nie obejmują one kosztów awaryjnej wymiany połączeń i strat produkcyjnych.

Nie jest wiadomym jaka część wymian połączeń dokonywanych jest w trybie awaryjnym oraz jakie straty są z tym związane. Jak widać wszelkie dodatkowe koszty szybko zwiększają łączne koszty wymian i połączeń taśm, powodując zwiększenie różnicy kosztów w obu strategiach wymian. Różnice wynikają z dużo większej częstości wymian połączeń klejonych, których trwałość jest trzykrotnie mniejsza niż połączeń wulkanizowanych. Przyjęcie trzykrotnie niższych kosztów postojowych dla połączeń klejonych w stosunku do wulkanizowanych powoduje utrzymanie początkowej różnicy kosztów dla wszystkich poziomów dodatkowych kosztów postojowych. Uwzględnienie dodatkowych kosztów związanych z postojem przedstawiono na rysunku 12.



Rys. 11. Wpływ ceny połączenia klejonego na łączne koszty wymian taśm i połączeń

Fig. 11. The impact of adhesive belts joints price on the total cost of belt and splices replacements costs



Rys. 12. Wpływ dodatkowych kosztów postojowych na łączne koszty wymian i połączeń

Fig. 12. The impact of additional downtimes costs on total costs of belts and splices replacements

Wnioski

Przedstawione analizy potwierdziły, że kluczowym parametrem wpływającym na łączne roczne koszty wymian i połączeń taśm jest trwałość taśm. Kopalnie powinny bacznie zwracać uwagę na właściwe ich użytkowanie i monitorowanie ich zużycia. Trwałość taśmy jest czynnikiem różnicującym łączne koszty w obu strategiach.

Drugim czynnikiem silnie wpływającym na łączne koszty wymian i połączeń taśm jest cena taśmy. Nie różnicuje ona kosztów obu strategii. Ważne jest, że wzrost ceny o 50 zł/m.b. (o 16,67%) przy analogicznym wzroście względnej trwałości redukuje łączne wydatki przy wulkanizacji o 9,1%. Wzrost trwałości szybciej obniża koszty przy stosowaniu wulkanizacji, gdyż trwałość połączeń tego typu jest identyczna z trwałością taśmy. Jeśli chodzi o łączne koszty w strategii klejenia taśm to pozostają one prawie na tym samym poziomie – nieznacznie rosną. Proporcjonalny względny wzrost cen i trwałości taśmy jest właściwie neutralny względem tej strategii. W strategii wulkanizacji osiąga się istotne korzyści względnej redukcji kosztów o około 10%. Ewentualne powiązanie wzrostu cen taśmy z gwarancją dłuższej jej pracy (proporcjonalną do wzrostu cen) jest korzystne dla kopalń o ile będą stosować łączenie taśm metodą wulkanizacji.

Istotny wpływ na zmniejszenie różnicy kosztów w obu strategiach jest trwałość połączeń. Niższa cena połączeń klejonych nie rekompensuje dużo niższej ich trwałości. Przyjęta względna różnica ceny połączenia klejonego wynosi około 36%, podczas gdy przyjęty względny spadek trwałości wyniósł 66,7%. Wzrost trwałości połączenia klejonego do dwóch lat praktycznie niweluje różnice kosztów w obu strategiach.

Niska trwałość połączeń klejonych wpływa na niską niezawodność pętli taśm i pociąga za sobą wysokie koszty postojów awaryjnych i strat produkcji spowodowanych tym postojem. Nie były one uwzględniane w analizie. Warto przeprowadzić szacunki kosztów obu strategii z uwzględnieniem stochastycznych właściwości trwałości taśm i połączeń, np. poprzez symulację ich wymian metodą Monte Carlo.

Wyniki analizy deterministycznej tu przeprowadzonej, nawet przy uwzględnieniu wyników badania wrażliwości łącznych kosztów na zmianę wielu parametrów, nie w pełni oddają ryzyko i koszty prowadzenia wymian obiema metodami. W analizie symulacyjnej łatwo uwzględnić skutki obu strategii dla niezawodności systemu transportowego. Można też lepiej ocenić konsekwencje ekonomiczne gwarancji oferowanych przez producentów taśm i usługodawców oraz zbadać, kto na gwarancjach zyskuje, a kto traci. Gwarancje wcale nie muszą być grą o sumie zerowej, bo nawet w analizie deterministycznej wykazano, że jednakowy względny wzrost cen i trwałości taśm generuje oszczędności, a więc suma jest dodatnia.

Przeliczenie oszacowanych w tej pracy rocznych kosztów wymian taśm i ich połączeń dla różnych strategii łączenia, kosztów i trwałości można dostosować do warunków konkretnej kopalni, mnożąc uzyskane w tej pracy wartości przez faktyczną długość zainstalowanych taśm podaną w kilometrach i dzieląc przez 10. Dla tylu kilometrów taśm przeprowadzono bowiem obliczenia w tej pracy.

W pracy przeanalizowano koszty strategii wykonywania połączeń klejonych i wulkanizowanych. Kopalnie mogą jednak wykonywać jedno i drugie. Rzeczywiste koszty mogą

więc być wyznaczone jako średnia ważona kosztów w obu strategiach stosownie do częstości korzystania z obu metod łączenia taśm.

Publikacja finansowana ze środków projektu PBS III ścieżka A pt. „Złącza wieloprzekładkowych taśm przENOŚNIKOWYCH o zwiększonej trwałości eksploatacyjnej” umowa nr PBS3/A2/17/2015.

Literatura

- Abramczyk, A. 2015. Dobór taśm przENOŚNIKOWYCH. Wyniki ankiety. Inżynieria i Utrzymanie Ruchu Zakładów Przemysłowych 9 lipca 2015. [Online] Dostępne w: <http://www.utzymanieruchu.pl/menu-gorne/artukul/article/dobor-tasm-przenosnikowych/> [Dostęp: 9.05.2017].
- Abramczyk, A. 2016. Raport specjalny: Przenośniki i pasy. Inżynieria i Utrzymanie Ruchu nr 3. [Online] Dostępne w: <http://www.utzymanieruchu.pl/menu-gorne/artukul/article/raport-specjalny-przenosniki-i-pasy/> [Dostęp: 11.05.2017].
- Ambrisko i in. 2016 – Ambrisko, L., Marasova, D. i Grendel, P. 2016. Determination the effect of factors affecting the tensile strength of fabric conveyor belts. Eksploatacji i Niezawodność – Maintenance and Reliability, 18(1), s. 110–116. [Online] Dostępne w: <http://dx.doi.org/10.17531/ein.2016.1.14> [Dostęp: 11.05.2017].
- Bajda i in. 2016 – Bajda, M., Błażej, R. i Hardygóra, M. 2016. Impact of selected parameters on the fatigue strength of splices on multiply textile conveyor belts. World Multidisciplinary Earth Sciences Symposium (WMESS 2016), 5–9 September 2016, Prague, Czech Republic. IOP Publishing, 2016. art. 052021, s. 1–6, IOP Conference Series – Earth and Environmental Science, ISSN 1755-1315; vol. 44. [Online] Dostępne w: <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/44/5/052021> [Dostęp: 11.05.2017].
- Bajda i in. 2016 – Bajda, M., Błażej, R., Jurdziak, L. i Kirjanów, A. 2016. Condition monitoring of textile belts in the light of research results of their resistance to punctures investigations. 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference, SGEM 2016: science and technologies in geology, exploration and mining: conference proceedings, Albena, Bulgaria, 30 June–6 July, Vol. 2, Exploration and mining, mineral processing. Sofia: STEF92 Technology, s. 165-172 (WOS).
- Bancroft B., Fromme Ch., Pilarski T., 2003. Belt Vision System for Monitoring Mechanical Splices. Materiały konferencyjne: Longwall USA International Exhibition and Conference.
- Błażej i in. 2015 – Błażej, R., Jurdziak, L. i Kawalec, W. 2015. Why Weibull Distribution Can Be Used to Describe Belt Segment and Belt Loop Operating Time and Why It Is Not Enough To Use It To Predict Remaining Belt Life? Proceedings of the World Congress on Engineering 2015 Vol I, WCE 2015, July 1–3, London, U.K. [Online] Dostępne w: http://www.iaeng.org/publication/WCE2015/WCE2015_pp557-561.pdf [Dostęp: 11.05.2017].
- Błażej i in. 2002 – Błażej, R., Hardygóra, M. i Komander, H. 2002. Wpływ wybranych parametrów na trwałość zmęczeniową połączeń wieloprzekładkowych taśm przENOŚNIKOWYCH. *Transport Przemysłowy* 3(9), s. 5–9.
- Błażej, R. i Hardygóra, M. 2003. Modeling of shear stresses in multiply belt splices. *Bulk Solids Handling* Vol. 23, No. 4, s. 234–241.
- Błażej, R. i Jurdziak, L. 2013. Możliwości wykorzystania systemów wizyjnych do oceny stanu taśm przENOŚNIKOWYCH i złączy w kopalniach podziemnych. *XXII Szkoła Eksploatacji Podziemnej*, materiały konferencyjne, Kraków, 18–22 lutego 2013, s. 1–14. [Online] Dostępne w: http://www.diagbelt.pwr.edu.pl/Publikacje/S.E.P._XXII_2013.pdf [Dostęp: 11.05.2017].
- Błażej i in. 2012 – Błażej, R., Hardygóra, M. i Jurdziak, L. 2012. Optyczne urządzenie do wizualnej oceny stanu powierzchni taśm przENOŚNIKOWYCH. *II Międzynarodowy Kongres Górnictwa Rud Miedzi*, materiały konferencyjne, Lubin, 16–18 lipca 2012. KGHM Cuprum, s. 244–253. [Online] Dostępne w: http://www.diagbelt.pwr.edu.pl/Publikacje/RBlazejMHHardygoraLJurdziak_cuprum%202012.pdf [Dostęp: 11.05.2017].
- Błażej i in. 2016 – Błażej, R., Jurdziak, L. i Kawalec, W. 2016. *Condition monitoring of conveyor belts as a tool for proper selection of their replacement time*. Advances in condition monitoring of machinery in non-stationary operations: proceedings of the Fourth International Conference on Condition Monitoring of Machinery in Non-Stationary Operations, CMMNO'2014, Lyon, France, December 15–17, Springer, cop. 2016. s. 483–494, nr 4. [Online] Dostępne w: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-20463-5_37 [Dostęp: 11.05.2017].

- Błażej i in. 2015 – Błażej, R., Jurdziak, L., Kirjanów, A. i Kozłowski, T. 2015. Evaluation of the quality of steel cord belt splices based on belt condition examination using magnetic techniques. *Diagnostyka* 16, Vol. 16, No. 3. [Online] Dostępne w: http://diagnostyka.net.pl/archiwum/calystekst/16_3/09.pdf [Dostęp: 11.05.2017].
- Błażej i in. 2013 – Błażej, R., Jurdziak, L., Zimroz, R., Hardygóra, M. i Kawalec, W. 2013. Investigations of conveyor belts condition in the Institute of Mining Engineering at Wrocław University of Technology. 23rd World Mining Congress: Montreal, Canada, August 11–15, Westmount, Québec: Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, s. 1–9. [Online] Dostępne w: http://www.diagbelt.pwr.edu.pl/Publikacje/W.M.C._23rd_2013.pdf [Dostęp: 11.05.2017].
- Hardygóra i in. 2015 – Hardygóra, M., Bajda, M. i Błażej, R. 2015. Laboratory testing of conveyor textile belt joints used in underground mines. *Mining Science*, vol. 22, s. 161–169. [Online] Dostępne w: <http://www.miningscience.pwr.edu.pl/pdf-60937-4011?filename=Laboratory%20testing%20of.pdf> [Dostęp: 11.05.2017].
- Hardygóra i in. 2012 – Hardygóra, M., Komander, H., Błażej, R. i Jurdziak, L. 2012. Method of predicting the fatigue strength in multiplies splices of belt conveyors. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* Vol. 14, No. 2, s. 171–175.
- Jurdziak, L. 1998. Gospodarka taśmami przenośnikowymi w kopalniach – stan obecny i perspektywy. *Górnictwo Odkrywkowe* R. 40, nr 5/6, s. 63–81.
- Jurdziak, L. 1999. Wpływ zmian trwałości taśm na koszty eksploatacji przenośników. *Wiadomości Górnicze* 57, nr 10, s. 539–548.
- Jurdziak, L. i Szlichciński, Ł. 2002. Analiza polskiego rynku taśm przenośnikowych. *Transport Przemysłowy* nr 3(9).
- Mazurkiewicz, D. 2005. Monitoring the condition of adhesive-sealed belt conveyors in operation. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 3, s. 41–49.
- Mazurkiewicz, D. 2006. Komputerowy system monitorowania stanu złączy taśm przenośnikowych. *Mechanizacja i Automatyka Górnictwa* R. 44, nr 4, s. 14–22.
- Projekt NCBiR 2015. Hardygóra, M., Bajda, R., Błażej, R., Woźniak, D., Jurdziak, L. i Paszkowska, G. *Złącza wieloprzekładowych taśm przenośnikowych o zwiększonej trwałości eksploatacyjnej*. Umowa nr PBS3/A2/17/2015.
- U.S. Department of Energy's, 2004. Effective Conveyor Belt Inspection for Improving Mining Productivity. U.S. Department of Energy Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. [Online] Dostępne w: http://www.nrec.ri.cmu.edu/projects/belt_inspection/tech/effectconvey.pdf [Dostęp: 11.05.2017].