

Eksploatacyjny współczynnik bezpieczeństwa taśm przenośnikowych z linkami stalowymi

Operational belt safety factor of steel-cord conveyor belts

Ryszard Błażej, Leszek Jurdziak, Witold Kawalec

Współczynnik bezpieczeństwa taśmy (BSF) stosowany przy doborze wymaganej wytrzymałości taśmy przenośnikowej na rozciąganie w kierunku wzdłużnym jest utrzymywany praktycznie bez zmian od wielu lat w obowiązujących zapisach norm: DIN 22101 lub norm amerykańskich CEMA. W odniesieniu do taśm z linkami stalowymi nadal obowiązują wyznaczone laboratoryjnie przed blisko pół wiekiem wartości spadku wytrzymałości w złączach i oszacowanie nadwyżki sił w stanach nieustalonych oraz spowodowane oporami skupionymi i warunkami eksploatacji. Doświadczenia użytkowników wskazują na znaczne przeskalowanie wytrzymałości taśm z linkami stalowymi szczególnie w długich, wysoko wydajnych przenośnikach. Autorzy proponują wykorzystanie nowoczesnych metod obliczania oporów ruchu i sił w taśmie wraz z wdrażanymi ostatnio kompleksowymi metodami diagnostyki taśm z linkami stalowymi na przenośniku, w celu wyznaczenia i monitorowania eksploatacyjnego współczynnika bezpieczeństwa taśm (OBSF).

Współczynnik bezpieczeństwa taśmy (BSF), stosowany przy doborze wymaganej wytrzymałości taśmy przenośnikowej na rozciąganie w kierunku wzdłużnym, jest utrzymywany praktycznie bez zmian od wielu lat w obowiązujących zapisach norm DIN 22101 lub norm amerykańskich CEMA. Okazjonalnie, zwłaszcza dla potrzeb przenośników dalekiego zasięgu, jego wartości bywają arbitralnie obniżane bez powodowania zagrożeń dla eksploatacji taśmy, ale te pozytywne doświadczenia nie prowadzą do zakwestionowania metody określania BSF.

W technice często się zdarza, że innowacyjne pomysły i zamierzenia są wdrażane dopiero po wielu latach, gdy zostaną spełnione wszystkie niezbędne warunki. Alex Harrison – znany z wielu cennych prac z zakresu transportu taśmowego, inicjator idei nieniszczącego diagnozowania stanu (NDT) taśm przenośnikowych i autor pierwszego patentu w tej dziedzinie [Harrison 1979] już przed blisko 20 laty postulował celowość wprowadzenia i monitorowania eksploatacyjnego współczynnika bezpieczeństwa taśm (OBSF), wyznaczonego na podstawie analizy wyników NDT [Harrison 1996]. Opracował procedurę analizowania wyników monitoringu aktualnego stanu taśm z linkami stalowymi pod kątem identyfikacji stref lokalnego spadku wytrzymałości i wyznaczenia współczynników eksploatacyjnego zmniejszenia bazowego BSF. Przedstawił wartości współczynnika koncentracji naprężeń w funkcji liczby przerwanych linek w taśmie [Harrison 1990] oraz specjalistyczną aplikację, służącą do bieżącej kontroli OBSF [Har-

rison 2009]. Jako punkt wyjścia przyjął jednak normowy, konserwatywny współczynnik bezpieczeństwa, nie sugerując potrzeby nowej metody jego obliczania. W tym ujęciu analiza wyników diagnostycznych była jednak wykorzystywana wyłącznie do zmniejszenia bazowej wartości BSF do aktualnej – eksploatacyjnej (OBSF). Niewykluczone, że przyczyną tej ostrożności autora były liczne niedoskonałości wczesnych metod diagnostycznych, wyszczególnione w pracy [Kuzik & Blum 1996].

Uzasadnienie bazowej wartości BSF dla taśm z linkami stalowymi można znaleźć choćby na specjalistycznym forum [Bulk Solids Handling 2014]. W odniesieniu do tych taśm obowiązującą nadal eksperymentalną podstawą do wyznaczenia wartości BSF są wyniki prowadzonych na politechnice w Hanowerze w latach 60. i 70. ubiegłego wieku zmęczenia badań wytrzymałości połączeń taśm przenośnikowych po wielu (10 tysiącach) cyklach pracy. Ustalono wtedy ok. 64-proc. spadek wytrzymałości w stosunku do wytrzymałości calizny taśmy. Przyjęto też, że w stanach nieustalonych, siły w taśmie osiągają ok. 140% sił w stanie ustalonym, zużycie zmęczeniowe taśmy, błędy w wykonaniu połączeń, skutki nieosiowego biegu taśmy, przeginięcia na bębnach itd. mogą powodować dodatkowe, 100-proc. zwiększenie sił w taśmie (liczba przyjęta arbitralnie), co w sumie oznacza 2,4-krotne zwiększenie siły w taśmie w stosunku do obciążenia nominalnego w ruchu ustalonym.

Liczba $2,4/0,36 = 6,667$ – bazowy BSF dla taśm z linkami stalowymi – została uzyskana na podstawie tych założeń, czyli:

- poziomu nadwyżki dynamicznej siły w taśmie w ruchu nieustalonym (40%),
- wpływu czynników eksploatacyjnych (100%),
- poziomu wytrzymałości połączeń w odniesieniu do wytrzymałości rdzenia taśmy w caliznie (36%).

W kolejnych latach w normie DIN 22101 dodawano klasyfikację warunków eksploatacyjnych (obniżając wartość BSF do 8:1, a nawet 9,5:1), przy czym niektórzy specjaliści [np. Beckley w Bulk Solids Handling 2014] postulują rozszerzenie tych wartości zarówno w dół (5:1 dla korzystnych warunków eksploatacyjnych), jak i w górę (12,5:1 dla warunków bardzo ciężkich). Jest godne uwagi, że konstruktorzy i użytkownicy przenośników dalekiego zasięgu (o długości przekraczającej kilka kilometrów) stosują obniżony współczynnik bezpieczeństwa (np. 5,5; 5,0 nawet 4,0), uzasadniając to wysoką jakością eksploatacji i łagodnymi ruchami [Kawalec 2003], chociaż główną przyczyną jest brak taśm przenośnikowych o wytrzymałości, która byłaby konieczna w przypadku przyjęcia współczynnika standar-

dowego. Nordell [Bulk Solids Handling 2014] wskazuje z kolei na brak w normie zróżnicowania BSF dla przenośników długich i krótkich. Warto tu wspomnieć, że podstawy teoretyczne do szacowania trwałości taśm, uwzględniających długość pętli taśm przedstawił Żur [Żur 1975], a opracowany przez niego model zużycia taśmy został wielokrotnie potwierdzony wynikami analiz statystycznych [Błażej & Jurdziak 2012].

W ostatnich latach zaistniały istotne przesłanki, które umożliwiają wcielenie w życie koncepcji OBSF, rozwijającej przedstawioną wyżej ideę Harrisona:

- opracowano, przetestowano i zastosowano w praktyce projektowej i eksploatacyjnej zaawansowane oprogramowanie inżynierskie, pozwalające na dokładne obliczanie sił w taśmie w zróżnicowanych warunkach eksploatacyjnych, wykorzystujące metodę oporów jednostkowych oraz wariantowe modele urządzeń napinających i rozruchowych [Kawalec & Kulinowski 2007];
- usprawniono systemy napinania i rozruchu przenośników taśmowych, redukujące nadwyżki dynamiczne sił w taśmie [Kulinowski & Jabłoński R. 2006];
- udoskonalono technologię wykonywania trwałych połączeń taśm przenośnikowych z linkami stalowymi o mniejszej niż przed laty utracie wytrzymałości na rozciąganie [Hardygóra & Komander 2002];
- rozwinięto kompleksowe metody diagnostyczne taśm z linkami stalowymi, pozwalające na wszechstronną ocenę stopnia zużycia rdzenia taśmy w caliźnie i złączu [Błażej 2012].

Autorzy niniejszego artykułu proponują wykorzystanie tych technologicznych i informatycznych osiągnięć, w celu opracowania nowej koncepcji oszacowania eksploatacyjnego współczynnika bezpieczeństwa (OBSF) taśm z linkami stalowymi. Należy uzasadniona redukcja BSF, umożliwiająca zastosowanie taśm o niższej wytrzymałości na rozciąganie powoduje reakcję łańcuchową: zmniejszenie masy taśmy, redukcję oporów ruchu i oporów podnoszenia taśmy na odcinkach nachylonych, zmniejszenie siły w taśmie, ograniczenie potrzebnej mocy napędu, redukcję momentu rozruchowego, czyli nadwyżki dynamicznej sił w taśmie, co pociągnie wzrost, OBSF zapewniając bezpieczną eksploatację przenośnika.

Identyfikacja sił w taśmie w ruchu ustalonym i nieustalonym – zastosowanie specjalistycznego oprogramowania QNK-TT

Siły w taśmie przenośnika, będące podstawą do określenia potrzebnej wytrzymałości taśmy przenośnikowej, powinny być obliczane z wykorzystaniem nowoczesnych narzędzi inżynierskich [Kawalec, Kulinowski 2007]. W Instytucie Górnictwa Politechniki Wrocławskiej od lat prowadzone były prace badawcze w zakresie doskonalenia oryginalnej metody obliczeń oporów ruchu przenośników taśmowych, opartej na identyfikacji składowych oporów jednostkowych przenośnika na podstawie analizy zjawisk fizycznych towarzyszących przemieszczaniu się taśmy przenośnikowej wraz z urobkiem na trasie przenośnika [Gładysiewicz 2003].

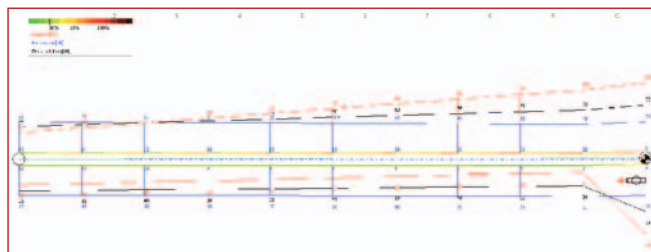
W wyniku tych prac powstał autorski algorytm obliczania oporów ruchu, zaimplementowany następnie w programie TASMTEST. Równolegle, w Krakowie „dojrzał” wszechstronny inżynierski program do kompleksowych obliczeń projektowych przenośników taśmowych – QNK, użytkowany obecnie przez wielu projektantów, producentów podzespołów przenośników, taśm przenośnikowych oraz m.in. w wielu kopalniach stosujących transport taśmowy.

Po połączeniu obydwu narzędzi w 2007 r. zbudowano specjalistyczne środowisko programowe do wszechstronnego wspomaganie projektowania przenośników taśmowych – QNK-TT. Opory ruchu przenośnika są w nim obliczane albo metodą podstawową (wg normy DIN 22101), albo – w module TT – dokładną metodą oporów jednostkowych, niezależnie dla poszczególnych obiektów trasy: zestawów krążnikowych, bębnow, punktów nadawy urobku i urządzeń czyszczących. Dla każdego obiektu obliczenia są wykonywane na podstawie:

- parametrów technicznych danego obiektu,
- parametrów technicznych taśmy przenośnikowej – medium przenoszącego siły na przenośniku,
- dokładnej konfiguracji przenośnika (przestrzenny profil trasy, układ bębnow, lokalizacja punktów nadawy urobku),
- wstępnie obliczonych sił w taśmie metodą podstawową,
- danych eksploatacyjnych (rodzaj nosiwa, wydajność, warunki eksploatacyjne).

Dokładne obliczenia oporów ruchu na odcinkach trasy i w węzłach konstrukcyjnych przenośnika (stacja zwrotna, czołowa, punkty nadawy urobku etc.) wraz z danymi o konfiguracji napędu i parametrami układu napinania taśmy pozwalają na identyfikację rozkładu sił w taśmie w ruchu ustalonym oraz (w przybliżeniu) sił dynamicznych występujących podczas rozruchu/ hamowania przenośnika (rys. 1).

Program QNK-TT pozwala na analizę wpływu doboru i ustawień urządzeń rozruchowych i napinających na wartość nadwyżki dynamicznej sił w taśmie w stanach nieustalonych [Kulinowski & Jabłoński 2006]. Należy zaznaczyć,



Rys. 1 Przykładowy wykres sił w taśmie analizowanego przenośnika w ruchu ustalonym i nieustalonym – podczas rozruchu i hamowania (QNK-TT)

że w celu doboru zarówno mocy napędu, jak i właściwej wytrzymałości taśmy, należy wykonać szereg wariantowych obliczeń danego przenośnika, przyjmując jako wiarygodne najbardziej niekorzystne warunki jego pracy:

- obciążenie urobkiem, powodujące występowanie największych sił w taśmie;
- najtrudniejsze przewidywane warunki eksploatacji (np. niska temperatura, konieczność rozruchu w pełni załadowanego przenośnika, występowanie niedomagań obsługi powodujących np. zbieganie taśmy i strugi urobku itd.);

- w przypadku przenośnika, który będzie w trakcie eksploatacji skracany, wydłużany lub przesuwany, należy wykonać obliczenia dla najtrudniejszej jego konfiguracji.

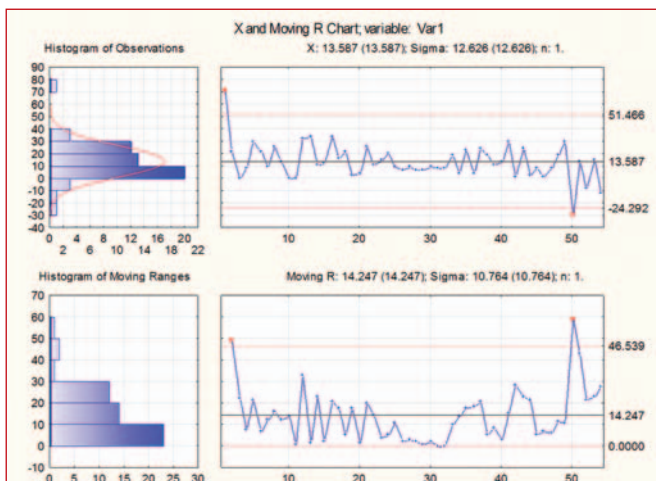
Wykonanie takiego cyklu obliczeń pozwala na wiarygodne wyznaczenie maksymalnej siły w taśmie przenośnika, która powinna być wykorzystana do określenia jej potrzebnej wytrzymałości zamiast przyjętej przed laty nadwyżki siły w taśmie (+40% dla stanów nieustalonych oraz +100% dla warunków eksploatacyjnych).

W przypadku stwierdzonego obniżenia aktualnej wytrzymałości taśmy (np. po zdiagnozowaniu przerwań kilku linek) można szybko drogą symulacji komputerowej zidentyfikować takie warunki pracy (np. ograniczone obciążenie urobkiem, łagodniejszy start i hamowanie), które pozwolą na jego bezpieczną eksploatację do czasu planowanej naprawy.

Trwałość współczesnych połączeń taśm z linkami stalowymi

Laboratorium Transportu Taśmowego (LTT) w Instytucie Górnictwa Politechniki Wrocławskiej dysponuje unikatowym zestawem pomiarowym do badania złącza w pełnej długości. Badania wytrzymałości połączeń wulkanizowanych taśm z linkami stalowymi były w LTT prowadzone przez wiele lat, dotyczyły łączenia różnych taśm typu St, wykonanych przez różne zespoły serwisowe i eksploatowanych przez różny okres. Jest to aktualnie najszersze dostępne spektrum wyników rzeczywistej wytrzymałości współczesnych połączeń wulkanizowanych taśm z linkami stalowymi, które zastępuje wyniki badań wykonanych dawniej w Hanowerze. Wyniki pomiarów przedstawiono w raporcie [Hardygóra & Komander 2002].

Na podstawie analizy statystycznej tych wyników można stwierdzić, że nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy, że rozkład spadku wytrzymałości taśmy w złączu jest rozkładem normalnym o średniej $m = 13,6$ i odchyleniu standardowym $\sigma = 14,3$ [Błażej i inni 2014]. Przyjmując następnie dla spadku wytrzymałości najbardziej rygorystyczne w analizie jakości kryterium 6σ , można wyznaczyć graniczny spadek wytrzymałości połączenia (rys. 2). Dla współcześnie wykonywanych połączeń taśm z linkami stalowymi średni spadek wytrzymałości wynosi ok. 14%, zaś graniczny – ok. 51%.

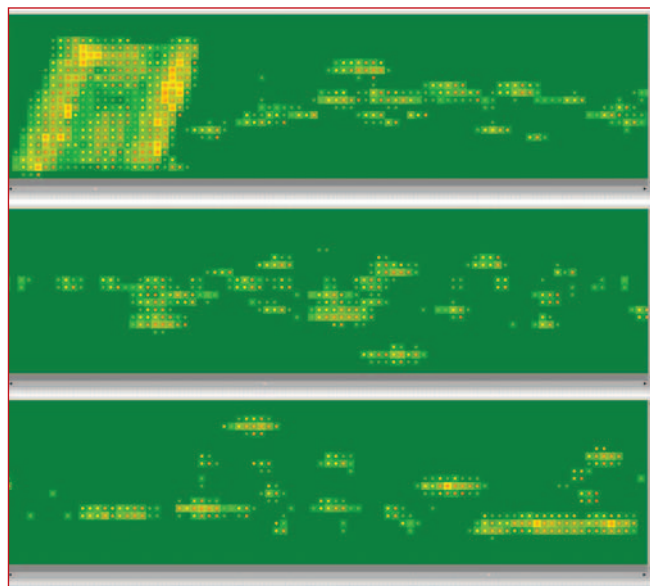


Rys. 2 Wykres kontroli jakości badanej zmiennej spadku wytrzymałości taśmy w złączu z zaznaczeniem obszaru 6σ (Statistica)

Zatem wytrzymałość złącza równa 49% wytrzymałości badanych taśm (zamiast obowiązujących w założeniach normy DIN 22101 35%) może być uważana za najniższą wartość, spełniającą wszelkie kryteria bezpieczeństwa wg kryterium 6σ . Warto zauważyć, że te wyniki są zgodne z publikowanymi przez Nordella na podstawie doświadczeń amerykańskich [Bulk Solids Handling 2014].

Ocena diagnostyczna stanu taśmy z linkami stalowymi

Bardziej precyzyjne szacowanie zużycia zmęczeniowego taśm z linkami stalowymi i ich połączeń [Błażej & Jurdziaik 2014] i dokładniejsze wyznaczanie maksymalnych sił w taśmie nie wyczerpuje zagadnień związanych z określaniem wpływu eksploatacji na stan taśmy. Oprócz stosowanej przez lata oceny wizualnej, tej ocenie służą rozwijane kompleksowe metody monitorowania stanu tych taśm [Harrison 1996; Błażej 2012; Błażej i inni 2014] oraz prace w zakresie modelowania rozkładu naprężeń w uszkodzonej taśmie z zastosowaniem metody elementów skończonych [Harrison 1990]. Dzięki analizie wyników z monitoringu taśmy podany w normie DIN 22101 wskaźnik wpływu czynników eksploatacyjnych (+100%) można zastąpić wartością wyznaczaną na podstawie diagnozy jej stanu.

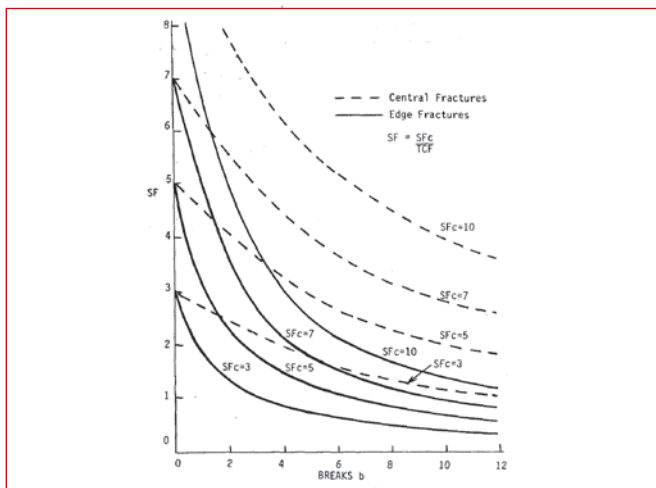


Rys. 3 Wizualizacja stanu kolejnych odcinków monitorowanej taśmy; stopień uszkodzenia jest obrazowany w dyskretnej, kwadratowej siatce, kolory kwadratowych obszarów siatki obrazują uśredniony stopień uszkodzenia, punkty – zarejestrowaną wartość maksymalną w obszarze [Błażej i inni 2014]

Te zagadnienia są opracowywane na Wydziale Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii Politechniki Wrocławskiej w ramach kolejnych prac badawczych i rozwojowych [Błażej i inni 2012, 2014]. W wyniku skanowania taśmy in-situ powstaje cyfrowa mapa taśmy oraz jej uszkodzeń, która jest następnie przetwarzana w celu identyfikacji ich skali i zasięgu, tak by możliwe było zdiagnozowanie np. liczby przeciętych (lub uszkodzonych w mniejszym stopniu) linek, niezbędne dla obliczenia lokalnego osłabienia wytrzymałości taśmy (rys. 3).

Cyfrowy, wektorowy obraz całej pętli taśmy umożliwiają również identyfikację poszczególnych odcinków taśmy, kolejnych złączy (za pomocą specjalnej procedury markowania) oraz stopnia ich uszkodzeń. Jeżeli jest dostępna baza danych taśm, to – oprócz oceny stanu aktualnego – można dokonać predykcji zużycia odcinków taśm i złączy [Błażej & Jurdziak 2014].

W przypadku uszkodzenia linki oprócz liczby uszkodzeń bardzo istotny jest ich przestrzenny rozkład. Uszkodzenie linki (linek) w caliznie taśmy lub w złączu powoduje bowiem spiętrzenie naprężeń w linkach sąsiednich. To zagadnienie przeanalizował Harrison [Harrison 1990, 2009] na podstawie wyników magnetycznej detekcji uszkodzeń linki. Autor zróżnicował przypadki przerywania linki na brzegu taśmy (groźniejszy dla jej wytrzymałości) oraz wewnątrz (pozwalający na relatywnie lepsze rozłożenie naprężeń). Przyjmując, że współczynnik bezpieczeństwa jest ilorazem siły zrywającej linkę i jej obciążenia, zerwanie linki sąsiedniej powoduje zwiększenie tego obciążenia, czyli zmniejsza wynikowy współczynnik bezpieczeństwa. Dla wariantowych przypadków uszkodzeń autor przedstawił wzory na obliczanie wskaźnika lokalnej koncentracji naprężeń (TCF). Wykres na rys. 4 obrazuje wynikowy współczynnik bezpieczeństwa w obszarze występowania zerwanych linki.



Rys. 4 Wynikowy współczynnik bezpieczeństwa (SF) w zależności od liczby zerwanych linki na brzegu (linia ciągła) lub wewnątrz taśmy (linia przerywana). SFc oznacza pierwotny BSF [Harrison 1990]

Procedura wyznaczania eksploatacyjnego współczynnika bezpieczeństwa wytrzymałości taśmy z linkami stalowymi

Przedstawione przesłanki skłaniają do podjęcia próby zbudowania formuły uzależniającej współczynnik bezpieczeństwa od:

- rzeczywistej – nie nominalnej – wytrzymałości pętli taśmy, z uwzględnieniem wiarygodnych informacji o jej aktualnym stanie i oszacowanego spadku wytrzymałości stosowanych połączeń taśm;
- warunków pracy w stanach nieustalonych – m.in. obliczonej nadwyżki dynamicznej sił w taśmie;
- warunków eksploatacyjnych: wielkość strugi urobku, zakres temperatur roboczych.

Taki współczynnik bezpieczeństwa, który nazwiemy eksploatacyjnym współczynnikiem bezpieczeństwa (OBSF), jest wskaźnikiem dynamicznym – zmieniającym się podczas eksploatacji taśmy, a jego obniżająca się aktualna wartość może być wykorzystana jako przesłanka do podjęcia albo działań naprawczych (wymiana taśm lub złączy, naprawa taśmy), albo zaradczych: obniżenie poziomu sił w taśmie (zmiana parametrów rozruchu lub napinania taśmy, ograniczenie wydajności roboczej – o ile jest to możliwe).

Eksploatacyjny współczynnik bezpieczeństwa taśmy na przenośniku OBSF jest definiowany jako iloraz:

$$OBSF = K_T / T_Z \quad (1)$$

gdzie:

K_T – zastępcza wytrzymałość dla pętli taśmy na przenośniku,
 T_Z – zastępcza siła napięcia taśmy na przenośniku.

Wartości zmiennych w (1) wymagają obliczeń. Zastępcza siła napięcia taśmy na przenośniku T_Z jest obliczana za pomocą specjalistycznego programu do obliczeń przenośników taśmowych QNK-TT. Do obliczeń jest przyjmowana największa siła w taśmie, wyliczona zgodnie z założeniami przyjmującymi najtrudniejsze możliwe warunki eksploatacyjne dla najbardziej niekorzystnej konfiguracji danego przenośnika.

Zastępcza wytrzymałość dla pętli taśmy K_T jest natomiast obliczana następująco:

$$K_T = \min_{i=1..n} (K_{Ti}) \quad (2)$$

gdzie:

K_{Ti} – zastępcza wytrzymałość odcinka taśmy wraz ze złączami,

n – liczba odcinków taśmy.

Przyjmujemy, że wytrzymałość całej pętli taśm jest równa wytrzymałości najsłabszego jej odcinka. Odcinek taśmy jest liczony „od złącza do złącza”. Wytrzymałość odcinka taśmy wynosi zatem:

$$K_{Ti} = \min (K_{Ti}, K_{zi1}, K_{zi2}) \quad (3)$$

gdzie:

K_{Ti} – wytrzymałość odcinka taśmy w caliznie,

K_{zi1} – wytrzymałość pierwszego złącza odcinka taśmy,

K_{zi2} – wytrzymałość drugiego złącza odcinka taśmy.

Zajmijmy się zatem wyznaczeniem wytrzymałości elementów składających się na odcinek taśmy. W przypadku złączy taśm możemy rozpatrywać następujące wartości:

- $t(K_{zi})$ – wytrzymałość złączy taśmy wyznaczona w badaniach laboratoryjnych (jeżeli złącza taśm danego przenośnika lub inne złącza dla tych samych taśm, wykonywane są w takich samych warunkach – technologia, warunki otoczenia, wykonawca) i oznaczono spadek ich wytrzymałości na zerwanie; w przypadku braku badań należy przyjąć wytrzymałość odcinka taśmy,
- $r(K_{zi})$ – zryczałtowana wytrzymałość złącza taśmy (49% wytrzymałości taśmy),
- $d(K_{zi})$ – diagnozowana wytrzymałość złącza taśmy; wyznaczona na podstawie zidentyfikowanych metodami diagnostycznymi uszkodzeń złącza – w przypadku zastosowania metod diagnostycznych i otrzymania mapy uszkodzeń

dzeń taśmy, w której występuje uszkodzenie linek w obrębie złącza w oparciu o przyjęte zależności obliczany jest wskaźnik koncentracji naprężeń TCF; alternatywnie wytrzymałość złącza może być oszacowana z zastosowaniem modelu oceny zużycia złącza taśm; w przypadku braku wyników diagnostyki i oceny zużycia $d(K_{zi}) = r(K_{zi})$. Mamy zatem:

$$K_{zi} = \min(t(K_{zi}), d(K_{zi}), r(K_{zi})) \quad (4)$$

gdzie:

$$r(K_{zi}) = r_p K_t \quad (\text{tu: } r_p = 0,49),$$

$t(K_{zi}) = r_p K_t$ (tu: $r_p = 1-4 K_{N\text{loss}}$; gdzie $K_{N\text{loss}}$ jest zmierzona wartością spadku wytrzymałości złącza; przyjęto, że wartość średnia i odchylenie standardowe spadku wytrzymałości złącza są w przybliżeniu równe – por. rys. 2),

$d(K_{zi})$ wyznacza się natomiast ze wzoru:

$$d(K_{zi}) = \min(t(K_{zi}), r(K_{zi}))/TCF \quad (5)$$

Zakładamy, że badania złączy taśm są wykonywane na złączach nieuszkodzonych, zatem wszelkie ich uszkodzenia nakładają się na spadek wytrzymałości taśmy w złączu.

Również K_t (wytrzymałość odcinka taśmy w całości) jest wyznaczana z uwzględnieniem wyników diagnostyki, czyli:

$$K_t = R(K_N)K_N \quad (6)$$

gdzie:

$R(K_N)$ – rezydualna wartość wytrzymałości taśmy (lub złącza), wyrażona w postaci ułamka jest odwrotnością wskaźnika koncentracji naprężeń TCF:

$$R(K_N) = 1/TCF \quad (7)$$

K_N – nominalna wytrzymałość odcinka taśmy.

Tak skonstruowany eksploatacyjny współczynnik bezpieczeństwa taśmy jest użyteczny w przypadku stosowania metod diagnostycznych, które pozwalają na okresową ocenę stanu pętli taśm i aktualizują rzeczywiste parametry wytrzymałościowe. W przypadku izolowanych uszkodzeń linek wskaźnik koncentracji naprężeń TCF jest wyznaczany wg wzorów podanych w artykule [Harrison 1990]. Jeżeli jednak występuje większa liczba uszkodzeń i sąsiadują one ze sobą, niezbędne jest wyznaczenie obszarów uszkodzeń (por. rys. 3).

Obliczenia $R(K_N)$ bazują na mapie uszkodzeń taśmy. Przyjęto następujące założenia w zakresie identyfikacji uszkodzeń.

- Odcinki taśm są identyfikowane – uszkodzenia można zatem przypisać konkretnym odcinkom lub konkretnym złączom; użytkownika zapewne interesuje nie tylko wynikowy eksploatacyjny współczynnik bezpieczeństwa, ale również stopień utraty wytrzymałości poszczególnych odcinków lub złączy. Z doświadczeń eksploatacyjnych wynika, że uszkodzenie 20% linek jest traktowane jako graniczne – dany odcinek jest wtedy wymieniany albo wycinany jest uszkodzony fragment.
- Każde uszkodzenie taśmy z linkami stalowymi może być opisane następującymi parametrami:
 - L – liczba uszkodzonych linek (przeciętych, naderwanych, skorodowanych etc.)

- $[x_1, x_2]$ i $[y_1, y_2]$ – współrzędne przedziału obszaru uszkodzenia; gdzie: x – współrzędna wzdłuż długości taśmy, y – współrzędna wzdłuż szerokości taśmy.

Procedura obliczania rezydualnej ułamkowej wartości wytrzymałości taśmy (lub złącza) przebiega następująco.

- Dla każdego odcinka taśmy (każdego złącza) współrzędne uszkodzeń są przeliczane na lokalny układ współrzędnych (gdzie: $0 < x <$ długość odcinka).
- Dla każdego uszkodzenia obliczane są współrzędne przedziału wpływu:

$$Ot([x_1, x_2]) = [x_1 - \Delta x, x_2 + \Delta x] \quad (8)$$

gdzie: zasięg przedziału wpływu (Δx) jest równy długości jednego stopnia w złączu – długości stopni są bowiem tak dobrane, by uzyskać równomierny rozkład obciążeń po przecięciu linki w złączu.

- Jeżeli obszary wpływu obejmują obiekt sąsiedni, tzn. uszkodzenie odcinka taśmy jest blisko złącza lub uszkodzenie złącza jest blisko odcinka taśmy, wtedy dane uszkodzenie jest dopisywane ze współrzędną x do wartości granicznej do tego obiektu. Zakładamy w ten sposób, że uszkodzenie obiektu na jego granicy może mieć wpływ na obiekt sąsiedni, co trzeba sprawdzić podczas analizowania tego obiektu.

- Po wyliczeniu współrzędnych przedziału wpływu następuje przeliczenie lokalnej utraty wytrzymałości w ten sposób, że uszkodzenia w obrębie wspólnego obszaru (tj. obszaru o nakładających się współrzędnych przedziału wpływu) są sumowane.

Mamy dwa uszkodzenia a i b :

$$U_a(L_a, [x_1, x_2], [y_1, y_2]) \text{ oraz } U_b(L_b, [x_1, x_2], [y_1, y_2]) \quad (9)$$

gdzie:

L – liczba uszkodzonych linek,

$[x_1, x_2]$ i $[y_1, y_2]$ – współrzędne przedziału obszaru uszkodzenia w danym uszkodzeniu.

Jeżeli przedziały (8): $[x_1 - \Delta x, x_2 + \Delta x]$, $[x_1 - \Delta x, x_2 + \Delta x]$ mają część wspólną, wtedy uszkodzenia U_a i U_b są zastępowane uszkodzeniem łącznym $U_{(a+b)}$ o parametrach:

$$U_{(a+b)}(L_a + L_b, [\min(x_1, x_1), \max(x_2, x_2)], [\min(y_1, y_1), \max(y_2, y_2)]) \quad (10)$$

Uszkodzenia w obszarach wspólnych są zatem sumowane.

Operację sumowania uszkodzeń można wykonywać kilkakrotnie, jeżeli obszary wpływu kolejnych uszkodzeń nakładają się.

- Po zagregowaniu wszystkich ewentualnych uszkodzeń zbiorczych następuje przeszukanie listy uszkodzeń. Dla uszkodzenia maksymalnego (obejmującego maksymalną liczbę uszkodzonych linek) wyznaczany jest wskaźnik koncentracji naprężeń TCF (z uwzględnieniem lokalizacji uszkodzeń – na brzegu lub wewnątrz taśmy) i wartość rezydualna wytrzymałości odcinka taśmy $R(K_N)$.

- Po wyznaczeniu $R(K_N)$ dla wszystkich odcinków taśm i złączy można obliczyć eksploatacyjny współczynnik bezpieczeństwa taśmy (OBSF) na przenośniku. Warunkiem zachowania bezpiecznej eksploatacji jest:

$$OBSF > 1 \quad (10)$$

Opisana powyżej procedura obliczania eksploatacyjnego współczynnika bezpieczeństwa pętli taśm jest oprogramowana w specjalnym module analizy wyników diagnostyki przeznaczonym do programu QNK-TT [Błażej i inni 2014].

Podsumowanie

Przedstawiono propozycję wyznaczania eksploatacyjnego współczynnika bezpieczeństwa pętli taśm (OBSF) na przenośniku, wykorzystującą osiągnięcia technologiczne w zakresie diagnostyki taśm z linkami stalowymi, postępowanie w wykonywaniu złączy taśm oraz nowoczesne metody obliczeń przenośników. OBSF jest przeznaczony do stosowania w systemach transportowych złożonych z przenośników z taśmą z linkami stalowymi, w których wdrażane są nowoczesne systemy diagnostyki taśm, umożliwiające przetwarzanie danych o uszkodzeniach taśmy wraz z ich lokalizacją przestrzenną. Można oczekiwać, że kompleksowe rozwiązanie: przenośnik z taśmą z linkami stalowymi (zaprojektowany z wykorzystaniem specjalistycznego oprogramowania do obliczania przenośników taśmowych) plus monitorowanie OBSF za pomocą nowoczesnego systemu diagnostycznego pozwoli na istotną redukcję wymaganego BSF. Poprzez spodziewane zmniejszenie wymagań wytrzymałości taśmy, proponowane rozwiązanie wpisuje się w trend budowania przenośników energooszczędnych. Takie rozwiązania są szczególnie atrakcyjne dla przenośników dalekiego zasięgu, w których wytrzymałość taśmy jest zwykle głównym czynnikiem ograniczającym długość trasy, co może być istotne np. w dalekim transporcie węgla brunatnego do elektrowni lub kruszyw do drogowych lub kolejowych punktów przeładunkowych. Innym potencjalnym obszarem wdrożenia metody wyznaczania OBSF są wielkie systemy transportowe, w których stosowana jest (lub rozważane jest jej wprowadzenie) okresowa diagnostyka stanu taśm i monitorowanie OBSF umożliwi zmniejszenie wytrzymałości (i masy) taśmy w dużej skali.

Artykuł powstał w ramach projektu rozwojowego w ramach Programu Badań Stosowanych w ścieżce A pt.: „Inteligentny system do automatycznego badania i ciągłej diagnozy stanu taśm przenośnikowych”.

Abstract

Belt Safety Factor (BSF), applied for identification of required belt tensile strength has not been practically modified for many years according to the valid DIN and CEMA standards. As far as steel-cord belts are concerned the values of splice dynamics fatigue efficiency as established by the laboratory tests that were made almost half a century are still valid as well as degradation from age, factory and field installation error factors and non-steady momentary factors. The users' experience suggest that the steel-cord belt tensile strength seems to be oversized, especially on the long, high capacity conveyors. The authors propose the use of modern methods of calculation of resistances to motion and belt tension together with the recently implemented complex methods of steel-cord belts in-situ diagnostics in order to identify and monitor the operational belt safety factor (OBSF) for steel-cord belts. ■

Literatura

- [1] Błażej R.: Review of the newest NDT equipment for conveyor belt diagnostics, *Diagnostyka*, nr 4(64)/2012.
- [2] Błażej R.: Inteligentny system do automatycznego badania i ciągłej diagnozy stanu taśm przenośnikowych – cele i założenia projektu badawczego, *Transport Przemysłowy i Maszyny Robocze*, nr 4(18)/2012.
- [3] Błażej R.: Inteligentny system do automatycznego badania i ciągłej diagnozy stanu taśm przenośnikowych. Zadanie 3 i 4. Część 1. Politechnika Wrocławska, Raport pracy badawczo-rozwojowej NCBiR (niepublikowany).
- [4] Błażej R. Jurdziak L.: Oszacowanie kosztów wymian taśm w kopalni podziemnej z uwzględnieniem konsekwencji awarii taśm, *Szkoła Eksploatacji Podziemnej 2014, Materiały Konferencyjne, IGSMiE PAN, Kraków 2014*.
- [5] *Bulk Solids Handling*, 2014, dyskusja internetowa nt. współczynnika bezpieczeństwa taśm z linkami stalowymi, uczestnicy: D. Beckley, L. Nordell, J. Paul.
- [6] Frank G.: Carcass strength relationships (conveyor & elevator belting), belt engineering & application consultant (notes).
- [7] Gładysiewicz L.: Przenośniki taśmowe. Teoria i obliczenia, *Oficyna Wyd. Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2003*.
- [8] Hardygóra M., Komander H.: Analiza wyników badań połączeń taśm przenośnikowych z linkami stalowymi, *Politechnika Wrocławska, Instytut Górnictwa, Laboratorium Transportu Taśmowego, raport, nr arch. Z-4/33/02 (niepublikowany), 2002*.
- [9] Harrison A.: A new development in conveyor belt monitoring, *Aust. Machinery & Production Engineering*, vol.32, nr 12, 1979.
- [10] Harrison A.: Safety factor calculations for high-strength inclined belts based on NDT signal analysis, *Int. Coal Handling and Util. Conf., Sydney, 19-21 June, 1990*.
- [11] Harrison A.: 15 years of conveyor belt nondestructive evaluation, *Bulk Solids Handling*, vol. 16, nr 1, 1996.
- [12] Harrison A.: Strain Analysis for Remote NDT of Damaged Bulk Handling Belts, *Bulk Solids and Powder-Science and Technology*, vol. 2, 2009.
- [13] Kawalec W.: Przenośniki taśmowe dalekiego zasięgu, *Transport Przemysłowy*, nr 1(11)/2003.
- [14] Kulinowski P., Jabłoński R.: Wybrane zagadnienia komputerowego wspomaganie projektowania urządzeń napinających taśmę, *Transport Przemysłowy*, nr (25)/2006.
- [15] Kulinowski P., Kawalec W.: Obliczenia przenośników taśmowych metodą podstawową oraz oporów jednostkowych w zintegrowanym środowisku programowym, *Transport Przemysłowy*, nr 2/2007.
- [16] Kuzik L., Blum D.: Scanning steel cord conveyor belts with the "Belt C.A.T.™" MDR System, *Bulk Solids Handling*, vol.16, nr 3, 1996.
- [17] Norma Gurtförderer für Schüttgüter – DIN 22101.
- [18] Żur T.: Metoda obliczania trwałości taśm przenośnikowych, *Górnictwo Odkrywkowe*, nr 1/1975.

dr inż. Ryszard Błażej
dr hab. inż. Leszek Jurdziak, prof. PWr
dr inż. Witold Kawalec
Politechnika Wrocławska