

Studium wybranych aspektów
diagnostyki eksploatacyjnej
transportu taśmowego



Politechnika Lubelska
Wydział Mechaniczny
ul. Nadbystrzycka 36
20-618 LUBLIN

Dariusz Mazurkiewicz

Studium wybranych aspektów diagnostyki eksploatacyjnej transportu taśmowego



Politechnika Lubelska
Lublin 2011

Recenzenci:

prof. dr hab. inż. Monika Hardygóra, Politechnika Wrocławska

prof. dr hab. Wojciech A. Moczulski, Politechnika Śląska

Publikacja wydana za zgodą Rektora Politechniki Lubelskiej

© Copyright by Politechnika Lubelska 2011

ISBN: 978-83-62596-18-8

Wydawca: Politechnika Lubelska

ul. Nadbystrzycka 38D, 20-618 Lublin

Realizacja: Biblioteka Politechniki Lubelskiej

Ośrodek ds. Wydawnictw i Biblioteki Cyfrowej

ul. Nadbystrzycka 36A, 20-618 Lublin

tel. (81) 538-46-59, email: wydawca@pollub.pl

www.biblioteka.pollub.pl

Druk: Drukarnia „Perfekta info”

ul. Doświadczalna 48, 20-280 Lublin

Elektroniczna wersja książki dostępna w Bibliotece Cyfrowej PL www.bc.pollub.pl

Nakład: 100 egz.

Spis treści

Wykaz ważniejszych oznaczeń	11
1. Wprowadzenie	12
2. Transport przerośnikowy - problematyka badawcza i eksploatacyjna	19
2.1. Przerośniki taśmowe	20
2.2. Taśma przerośnikowa	22
2.2.1. Metody łączenia taśm przerośnikowych	24
2.2.2. Wytrzymałość teoretyczna połączeń taśm przerośnikowych.....	27
2.2.3. Problematyka eksploatacyjna i badawcza taśm przerośnikowych i ich połączeń	28
2.3. Metody diagnostyczne w przerośnikowych układach transportowych	41
2.3.1. Diagnostyka i monitorowanie przerośnikowych systemów transportowych	42
2.3.2. Potrzeby rozwoju systemów diagnostycznych w przerośnikowych układach transportowych	45
2.4. Podsumowanie przeglądu literatury	49
3. Problematyka badawcza i zakres pracy	51
4. Analiza użytkowych właściwości taśm przerośnikowych	55
4.1. Badania laboratoryjne cech eksploatacyjnych taśm i ich złączy.....	56
4.2. Model numeryczny złącza klejowego taśmy przerośnikowej	64
4.2.1. Identyfikacja właściwości wytrzymałościowych materiałów złącza	65
4.2.2. Symulacja numeryczna stanu naprężenia i odkształcenia w obszarze złącza	73
4.2.2.1. Zakres obliczeń i charakterystyka numeryczna połączenia klejowego	73
4.2.2.2. Modelowanie numeryczne złącza taśmy czteroprzekładowej	79
4.2.3. Podsumowanie analizy wyników modelowania numerycznego	90
5. Monitorowanie stanu złączy taśm przerośnikowych	94
5.1. System monitorujący stan połączeń taśm przerośnikowych	95
5.1.1. Obiekt i cel badań	97
5.1.2. System pomiarowy i jego struktura	98
5.2. System oceny stanu technicznego złączy taśm przerośnikowych	105
6. System ekspertowy zarządzania eksploatacją taśm przerośnikowych	111
6.1. Inteligentny system doradczy diagnostyki złączy taśm przerośnikowych	114
6.2. Koncepcja inteligentnego modułu sterującego z wykorzystaniem logiki rozmytej	125
7. Podsumowanie i wnioski końcowe	130
Literatura	137

Dariusz Mazurkiewicz

Studium wybranych aspektów diagnostyki eksploatacyjnej transportu taśmowego

Streszczenie

Monografia dotyczy wybranych aspektów problematyki zapewnienia trwałości i niezawodności elementów przenośników taśmowych stanowiących podstawę rozbudowanych systemów transportu wewnątrzzakładowego. Na podstawie analizy aktualnego stanu literatury scharakteryzowano przyczyny i skutki uproszczeń, ograniczeń badawczych oraz niedostępności odpowiednich danych laboratoryjnych, wskazując jednocześnie potencjalne kierunki rozwoju systemów diagnostycznych możliwych do zastosowania w przenośnikowych układach transportowych. Ocena stanu wiedzy w tym zakresie stała się podstawą sformułowania cząstkowych zadań badawczych oraz głównego celu naukowego pracy, którym było opracowanie metodyki budowy inteligentnego systemu monitorowania złączy klejowych taśm przenośnikowych oraz zgromadzenie wiedzy potrzebnej do jego funkcjonowania. Realizacja założonego celu wymagała zaplanowania oraz przeprowadzenia w sposób systematyczny wielowątkowych badań, analiz oraz symulacji numerycznych.

Wskazano na potwierdzoną przeprowadzonymi badaniami laboratoryjnymi oraz testami w warunkach przemysłowych możliwość skutecznego wpływania na trwałość i niezawodność przenośnikowych systemów transportowych, dzięki zastosowaniu zaprojektowanego informatycznego systemu monitorowania stanu złączy taśm o różnej konstrukcji. Opracowanie takiej konstrukcji systemu diagnostycznego, zgromadzenie niezbędnej wiedzy do wnioskowania diagnostycznego oraz testy w warunkach przemysłowych stanowiły jeden z głównych etapów realizacji prowadzonych prac. Z racji stopnia skomplikowania analizy dużej ilości gromadzonych danych diagnostycznych dodatkowo opracowano i zweryfikowano metodę inteligentnego ich przetwarzania. Zastosowanie technik inteligentnych w proponowanej koncepcji modułu sterującego gwarantuje wysoką skuteczność efektywnego, w pełni zautomatyzowanego diagnozowania oraz zabezpieczenia analizowanego obiektu przed wystąpieniem uszkodzeń w czasie rzeczywistym.

8 Studium wybranych aspektów ...

Celem naukowym pracy było również opracowanie i analiza zaawansowanego modelu numerycznego typowego połączenia klejowego odcinków taśmy z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Opracowany model pozwala na analizę optymalizacyjną geometrii połączeń dla różnych taśm przenośnikowych oraz dowolnych konfiguracji właściwości wytrzymałościowych elementów konstrukcyjnych złącza klejowego.

Przeprowadzone prace stanowią kompleksowe podejście do badania analizowanych elementów systemu transportu, łącząc różne metody i techniki modelowania oraz pozyskiwania i weryfikacji danych. Tworzą tym samym bazę wiedzy w zakresie użytkowych właściwości taśm przenośnikowych. Zaprezentowane wyniki oraz propozycje rozwiązań technicznych i badawczych w zakresie szeroko rozumianej problematyki diagnostyki transportu taśmowego dostarczają ponadto wiedzy niezbędnej do racjonalnego wykorzystania narzędzi informatycznych w przemysłowych systemach wspomagania podejmowania decyzji. Szczególnie w obszarze rozwoju oraz wdrożeń metod i technik inteligentnych w przemysłowych systemach o pełnej automatyzacji.

Słowa kluczowe: złącza taśm przenośnikowych, diagnostyka eksploatacyjna, badania wytrzymałościowe, modelowanie numeryczne, systemy ekspertowe.

Dariusz Mazurkiewicz

**A study of selected aspects of operational diagnosis
of belt transport**

Summary

The monograph addresses selected issues related to the problem of ensuring durability and reliability of elements of belt conveyors as basic components of complex systems of in-house transport. An analysis of the current state of the literature provided a basis for the characterization of the causes and effects of simplifications and limitations of existing approaches and unavailability of relevant laboratory data. Simultaneously, new directions of development of diagnostic systems for use in conveyor transportation systems were indicated. The estimation of the state of the art in this area provided grounds for the formulation of research subtasks and the main scientific objective of the work, which was to develop a methodology for building an intelligent system for monitoring adhesive joints in conveyor belts and to collect the information needed for such a system to function. To achieve this objective, multi-threaded research, analyses, and numerical simulations were planned and carried out in a systematic manner.

Laboratory and industrial tests confirmed the possibility of effectively influencing the durability and reliability of conveyor transportation systems by using the newly developed computer system for monitoring the condition of belt joints of various design. Development of a diagnostic system of such design, acquisition of information indispensable for diagnostic inference, and industrial tests were some of the main stages of the work described in this volume. Because the large quantity of diagnostic data required complex analysis, a method for intelligent processing of these data was, additionally, developed and verified. The use of intelligent techniques in the proposed controlling module guarantees highly effective, fully automated diagnosis of an analyzed object and protection of this object against failure in real time.

Another scientific aim of this work was to develop and analyze an advanced finite element model of a typical adhesive joint for connecting sections of a conveyor belt. The model that was proposed makes it possible to conduct optimization analyses of joints for various belt conveyors and for any

configuration of strength properties of the structural elements of an adhesive joint.

The reported work represents a comprehensive approach to the study of the analyzed components of a transport system, as it combines various methods and techniques of modelling and acquisition and verification of data. It thus constitutes a knowledge base of functional properties of conveyor belts. Moreover, the presented results and proposed engineering and research solutions related to the broadly understood diagnosis of belt transport provide the knowledge that is indispensable for effective use of information tools in industrial decision support systems, in particular with regard to development and implementation of intelligent methods and techniques in fully automated industrial systems.

Key words: conveyor belt joints, operational diagnostics, strength tests, numerical modelling, expert systems.

Wykaz ważniejszych oznaczeń

- a – parametr interakcji,
- b – szerokość próbki,
- C_{ij} – stała materiałowa,
- D – ściśliwość,
- D_1 – stała materiałowa,
- E – moduł Younga,
- F – siła zrywająca,
- \bar{I}_1 – pierwszy niezmiennik dewiatora odkształcenia,
- \bar{I}_2 – drugi niezmiennik dewiatora odkształcenia,
- J – współczynnik objętości całkowitej,
- J_{el} – współczynniki objętości sprężystej,
- L – długość początkowa,
- L_p – długość początkowa złącza,
- N – stała materiałowa,
- R_p – wytrzymałość połączenia na rozciąganie,
- R_r – wytrzymałość taśmy na rozciąganie,
- $U(\varepsilon)$ – potencjał energii odkształcenia,
- U_{dev} – część postaciowa potencjału energii odkształcenia,
- U_{vol} – część objętościowa potencjału energii odkształcenia,
- z – liczba przekładek,
- σ – naprężenie,
- ε – odkształcenie,
- μ_0 – początkowy moduł odkształcenia postaciowego,
- μ_i – stała materiałowa,
- α_i – stała materiałowa,
- β – stała materiałowa,
- λ_m – stała materiałowa,
- $\bar{\lambda}_1$ – wartość dewiatorowa rozciągnięcia,
- λ_i – wartości główne rozciągnięcia,
- ν – współczynnik Poissona,
- $\sigma_2, \sigma_1, \sigma_3$ – składowe główne tensora naprężenia,
- μ_A – funkcja przynależności zbioru rozmytego A ,
- ΔL_p – wydłużenie w chwili zerwania,
- ε_p – odkształcenie plastyczne,
- ε_s – odkształcenie sprężyste.

1. Wprowadzenie

Niezwykle dynamiczny w ostatnich dziesięcioleciach rozwój przemysłu z jednej strony jest skutkiem ciągle nowych możliwości, jakie oferują najnowsze techniki, technologie, czy też wyniki badań naukowych, ale też jest istotnym wynikiem wzrostu znaczenia konkurencyjności na globalnym rynku. Przedsiębiorstwa działające w warunkach nieustającej rywalizacji, pogoni za innowacyjnymi produktami, które zaspokoją rosnące wymagania klientów, przy jednoczesnej stałej konieczności obniżania kosztów, zmuszone są do stosowania coraz to nowocześniejszych środków technicznych. W konsekwencji tego faktu, środki te, w tym szczególnie maszyny i urządzenia technologiczne stają się bardziej złożone i skomplikowane, stawiając tym samym coraz większe wymagania wobec zarówno ich projektantów, jak i użytkowników. Oznacza to między innymi konieczność zapewnienia odpowiednich warunków eksploatacyjnych maszyn, urządzeń, czy też całych systemów produkcyjnych, rozumianą w tym przypadku, jako konieczność zastosowania odpowiednich metod i technik gwarantujących ich trwałość oraz niezawodność.

Dlatego też od szeregu lat ciągłemu rozwojowi podlega również dziedzina diagnostyki technicznej, zajmująca się oceną, czy też rozpoznaniem stanu pojedynczych urządzeń technicznych, jak i całych procesów technologicznych. Rozpoznanie stanu obiektu technicznego zgodnie z definicją [105], może być rozpatrywane, jako diagnozowanie, genezowanie lub prognozowanie. Pierwsza z wymienionych możliwości, której celem jest poznanie aktualnego stanu obiektu, oraz ostatnia – oznaczająca określenie przyszłych jego stanów, są szczególnie istotne w przypadku ciągłych systemów transportu wewnątrzzakładowego realizowanego w oparciu o przenośniki taśmowe. Przyjęcie bowiem strategii eksploatacyjnej tych urządzeń wg kryterium ich stanu technicznego, opiera się na podejmowaniu decyzji eksploatacyjnych na podstawie bieżącej oceny. Aktualny stan techniczny odwzorowany precyzyjnie określonymi wartościami mierzonych symptomów jest zatem podstawą podejmowania skutecznych decyzji eksploatacyjnych [34, 204, 206, 207].

Przenośniki taśmowe to właśnie jedna z kategorii urządzeń, które w ostatnich latach nabrały nowego znaczenia zarówno dzięki rosnącemu zakresowi możliwych zastosowań, jak i w wyniku szeregu prac prowadzonych nad ich nowymi rozwiązaniami konstrukcyjnymi. Nowe zastosowania przenośników w systemach transportowych to między innymi efekt konieczności obniżenia kosztów transportu realizowanego dotychczas z wykorzystaniem pojazdów kołowych. Dodatkowym, istotnym argumentem było również dążenie

do obniżenia kosztów eksploatacyjnych systemów transportowych, przy zapewnieniu dostatecznie wysokiej niezawodności i trwałości, które udało się osiągnąć między innymi dzięki intensywnym pracom nad nowymi rozwiązaniami konstrukcyjnymi przenośników taśmowych.

Przenośniki taśmowe to podstawowe urządzenia transportu w przemyśle wydobywczym. Transport taśmowy (rys. 1.1) ze względu na wiele zalet stosowany jest również w szeregu innych gałęziach przemysłu, na przykład w zakładach przeróbki surowców mineralnych, w przemyśle hutniczym, cementowo-wapienniczym, papierniczym, w portach morskich i śródlądowych, w budownictwie, rolnictwie i w cukrowniach, czy też w ogólnie rozumianym transporcie wewnątrzzakładowym przedsiębiorstw o różnym profilu produkcji i usług [8].

a)



b)



Rys. 1.1 - Przykładowe zastosowania transportu przenośnikowego [196]:
a) transport materiału skalnego, b) przenośnik taśmowy jako element rozbudowanego szeregowego systemu transportowego

Jak definiuje Antoniak [5, 8, 9], przenośniki o ruchu ciągłym są to mechaniczne, pneumatyczne lub hydrauliczne środki transportu bliskiego, w których nosiwo, na ściśle określonej drodze, ograniczonej odległością między punktem załadowniczym i wyładowniczym, jest przemieszczane cyklicznie albo w sposób ciągły, ze stałą lub zmienną prędkością. Przenośniki, które w zależności od budowy mogą przemieszczać nosiwo pod dowolnym kątem od położenia poziomego do pionowego, w linii prostej lub po krzywej, są budowane, jako stacjonarne, przesuwne lub przewoźne i służą szczególnie do transportu materiałów sypkich i drobnicy, a w specjalnych wykonaniach również do przewozu ludzi.

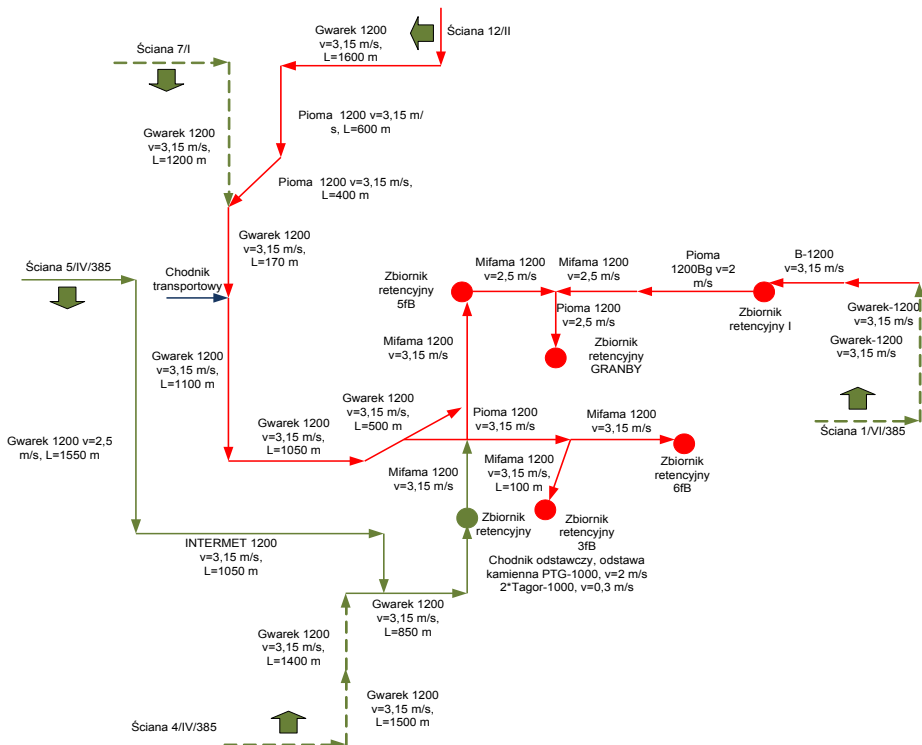
Przenośniki taśmowe w porównaniu do innych środków transportu, w tym stosowanych w transporcie wewnątrzzakładowym mają liczne zalety. Można do nich zaliczyć między innymi [5, 8, 9, 58, 60, 209]:

- dużą wydajność przy jednoczesnym efektywnym i sprawnym transporcie różnego rodzaju materiałów, w tym materiałów sypkich o zróżnicowanych właściwościach fizyczno-mechanicznych, z niskim stopniem ich degradacji podczas przemieszczania,
- łatwość dostosowania konstrukcji przenośnika do ukształtowania terenu, na jakim jest zabudowany,
- wysoki stopień typizacji, lekką konstrukcję, którą w łatwy sposób można przemieścić i przebudowywać, z jednoczesnym zapewnieniem łatwości wydłużania, skracania oraz relokacji w stosunkowo krótkim czasie i przy minimalnym nakładzie pracy,
- łatwość zastosowania automatyzacji i sterowania ich pracą,
- małą pracochłonność obsługi, konserwacji i dozoru oraz możliwość pracy w różnych warunkach klimatycznych,
- wysoką trwałość i niezawodność.

Mimo powszechnego zastosowania oraz licznych zalet przenośniki taśmowe posiadają również pewne wady, które w większości związane są z najdroższym ich elementem konstrukcyjnym, jakim jest taśma przenośnikowa. Wady te, to między innymi [5, 9] wysoka wrażliwość taśmy na działanie temperatury, czynników biologicznych, chemicznych oraz na zawartość w transportowanym materiale dużych brył o ostrych krawędziach, jej stosunkowo niska trwałość oraz mała wytrzymałość połączeń taśmy.

Dzięki jednak bezsprzecznej przewadze zalet nad wadami, szereg przedsiębiorstw zdecydowało się w ostatnich latach na zastąpienie transportu szynowego oraz samochodowego właśnie przenośnikami taśmowymi. W efekcie tego, tylko w polskim przemyśle wydobywczym w roku 2007 użytkowano około trzech tysięcy różnego typu przenośników taśmowych, tworzących często kilkunastokilometrowe systemy transportowe, w których eksploatowanych było łącznie niemal dwa tysiące kilometrów taśmy [100]. W jednym z ciekawszych rozwiązań systemu transportu bazującego właśnie na przenośnikach taśmowych, jaki zastosowano w Oddziale KGHM S.A. Polska Miedź Zakład Górniczy „Rudna” pracuje aktualnie 68 przenośników o łącznej długości trasy 45,5 km [18]. Trasa najdłuższego przenośnika w tym systemie wynosi 1930 m, a pojedyncze ciągi transportowe osiągają długość kilkunastu kilometrów, gdzie transportowany materiał przenoszony jest od punktu załadunkowego do wyładunkowego w czasie dochodzącym do 70 minut. Układ transportu taśmowego w ZG „Rudna” oparty jest nie na typowo stosowanym układzie liniowym, ale na tak zwanym kwadracie odstawy. Takie rozwiązanie zapewnia duże wykorzystanie zdolności transportowej przenośników i mimo większych nakładów na prace konserwacyjno-remontowe daje możliwość pełnego i optymalnego wykorzystania wydajności, co z kolei wpływa na obniżenie kosztu jednostkowego transportu jednej tony rudy [18].

Zastosowana w ZG „Rudna” struktura systemu transportu pociąga za sobą jednak konieczność zapewnienia dużej niezawodności poszczególnych przenośników. Niezawodność przenośników taśmowych to typowy problem również w przypadku systemu transportu urobku w firmie Lubelski Węgiel „Bogdanka” S.A. System transportu realizuje tam odstawę urobku przenośnikami taśmowymi z trzech ścian wydobywczych oraz z sześciu przodków chodnikowych (rys. 1.2).



Rys. 1.2 - System transportu urobku w polu Bogdanka (stan na dzień 25.01.2010) [126]

Wydatność systemu zharmonizowana jest ze zdolnością wydobywczą szybu, która wynosi 23500 t/d. W LW Bogdanka S.A. w systemie czterozmianowym równocześnie eksploatowane są ściany wydobywcze, które zapewniają wydobyć rzędu 21000 t/d urobku brutto. Pozostałe 2500 t/d wynikające ze zdolności wydobywczej szybu to urobek pochodzący z drażenia przodków chodnikowych, których sumaryczny dobowy postęp to ok. 100 m.

Wszystkie stosowane przenośniki taśmowe odstawy ścianowej (GWAREK-1200, B-200S, MIFAMA-1200, INTERMET-1200) zawierają w swojej konstrukcji taśmę o szerokości 1200 mm. Przenośniki taśmowe odstawy przodkowej (GWAREK-1000 i B-1000, PTG-50/1000, TAGOR-50/1000, LABOR-1000) pracują z wykorzystaniem taśmy o szerokości 1000 mm. W systemie transportowym LW Bogdanka S.A. pracuje obecnie 29 przenośników taśmowych odstawy ścianowej oraz 38 przenośników taśmowych odstawy przodkowej. Trasa najdłuższego przenośnika w tym systemie to 1600 m, a najdłuższy pojedynczy ciąg transportowy ma długość prawie 6 kilometrów.

Mimo wysokiej kultury pracy oraz nacisku kładzionego w LW Bogdanka S.A. na problematykę zapewnienia niezawodności oraz wysokiej ekonomiczności transportu taśmowego, na przestrzeni 12 miesięcy roku 2009 zanotowano tam w sumie 216 awarii przenośników chodnikowych oraz 89 awarii przenośników ścianowych skutkujących ich zatrzymaniem. W całkowitej sumie 305 awarii transportu taśmowego skutkujących przestojami łącznie w czasie 437,9 godzin, przestoje w wyniku awarii taśmy (naderwanie, rozerwanie wzdłużne, regeneracja złącza itp.) stanowiły 46,8 godzin, co jest równe 11% sumarycznego czasu ich wyłączenia z eksploatacji. Na uwagę zasługuje fakt, że w ogólnej sumie zarejestrowanych awarii, 72 uszkodzenia (24% ogólnej ich liczby) skutkowały przestojami długotrwałymi (powyżej 2 godzin), z czego 21% z nich (15 awarii) było skutkiem problemów z taśmą.

Przeliczając nawet z dużym przybliżeniem całkowity czas przestoju transportu w wyniku uszkodzenia jedynie samej taśmy (2,6 dnia roboczego) na koszt wykonania napraw oraz strat poniesionych w wyniku ograniczenia wydobywania [152] stwierdzimy, jak istotnym zagadnieniem dla każdego przedsiębiorstwa jest zapewnienie odpowiedniej niezawodności systemu transportu taśmowego. Przeanalizowana statystyka awarii transportu taśmowego w LW Bogdanka S.A. stanowi reprezentatywny przykład potwierdzający wpływ trwałości, jakości i bezawaryjności użytkowania taśm przenośnikowych oraz ich połączeń na wynik ekonomiczny działalności przedsiębiorstwa. Podobnie wnioski wynikają również z analizy sposobu zużycia taśm tkaninowo-gumowych pracujących w KWB Turów, ZG Rudna oraz KWB Bełchatów [19, 26, 37, 128]. W analizowanym okresie 5 lat w pierwszej z kopalń wykonano ponad 5000 połączeń na taśmach tkaninowo-gumowych, a z analizy uszkodzeń w okresie 10-letnim wynika, że z zestawionych ogółem 496 uszkodzeń połączeń, 55 miało miejsce na maszynach podstawowych, pozostałe 441 wystąpiło na przenośnikach ciągu transportowego [128].

Coraz szersze zastosowanie przenośników taśmowych w systemach transportu, na co wpływ ma wiele istotnych czynników, w tym między innymi ochrona środowiska, oraz potencjalna łatwość ich automatyzacji [6, 18], przy jednoczesnej świadomości licznych niedoskonałości tego środka transportu sprawia, że przenośniki taśmowe to urządzenia, których budowa

oraz zastosowania podlegają ciągłym zmianom o charakterze innowacyjnym. Ścisłe określone są również kierunki i prognozy dalszego ich rozwoju oraz optymalizacji [10, 68, 179], obejmujące między innymi konieczność skupiania się na rozwiązaniach energooszczędnych przy dążeniu do zwiększenia niezawodności elementów ich konstrukcji, w tym najbardziej newralgicznych miejsc łączenia odcinków taśmy. Niezbędna jest również optymalizacja siły napięcia taśmy z uwzględnieniem różnych warunków obciążenia przenośnika, co w konsekwencji powinno przyczynić się do zwiększenia trwałości taśmy oraz jej połączeń. Wskazane jest ponadto dążenie do ograniczenia liczby połączeń odcinków taśmy, z racji ich dużego wpływu na awaryjność całego urządzenia. Jest to jednak dość kłopotliwe w realizacji z uwagi na coraz powszechniejsze stosowanie przenośników o długości trasy dochodzącej nawet do 30 km z szacowaną i gwarantowaną przez producentów trwałością taśmy przez okres 10 lat [68].

Na obecnym etapie rozwoju techniki dąży się do tego, aby każdy system transportu był coraz bardziej zmechanizowany i automatycznie sterowany. Zastosowany w takim przypadku sterownik powinien mieć możliwość wykorzystywania w czasie rzeczywistym danych gromadzonych w odpowiednio zaprojektowanej bazie wiedzy. Podobne cele dotyczące kompleksowej automatyzacji oraz mechanizacji stawia się w przypadku definiowania kierunków rozwoju konstrukcji przenośników taśmowych. Wynika to ze specyfiki konstrukcyjnej tych urządzeń oraz warunków ich pracy, kiedy to istotną cechą jest konieczność stałego przedłużania lub skracania taśmy w miarę przemieszczania się frontu robót. Bardzo ważna dla zapewnienia ciągłej i bezawaryjnej pracy tych urządzeń jest ponadto możliwość występowania okresowych przeciążeń transportowanym materiałem, znacznie przewyższających obciążenia nominalne. W konsekwencji często powoduje to zerwania taśmy, najczęściej w obszarze połączenia, trwale unieruchamiające prowadzony transport, generując tym samym znaczne straty finansowe. Nieprzewidziane przeciążenia taśmy mogą również być efektem jej zablokowania, bocznego schodzenia lub zanieczyszczenia bębnow [5, 6, 8, 9].

Mała trwałość taśmy oraz mała wytrzymałość połączeń taśm w przypadku wystąpienia dużych pod względem wartości sił zrywających – to główne problemy eksploatacyjne tych powszechnie stosowanych urządzeń transportowych. Typowe połączenia taśm, wykonywane są na przykład metodą klejenia i posiadają zarówno liczne wady, jak i zalety. Do ich istotnych wad należy zaliczyć niską wytrzymałość na zrywanie w porównaniu z samą taśmą [5, 6, 8, 28, 29, 82, 141]. W efekcie tego często dochodzi do zerwania taśm przenośnikowych w obszarze połączenia bez jakichkolwiek wcześniejszych symptomów mogących świadczyć o bliskim wystąpieniu tego typu uszkodzenia. Jest to oczywiście okoliczność ze wszech miar wysoce niepożądana. Dlatego też prowadzone obecnie prace badawcze i wdrożeniowe nad połączeniami wieloprzekładowych taśm przenośnikowych zmierzają w większości

do podniesienia wytrzymałości i trwałości różnego rodzaju połączeń, czy też związanej z tym celem optymalizacji ich geometrii. Dotychczas brak jest natomiast rozwiązań, czy nawet prób podjęcia tematu monitorowania stanu złączy, szczególnie taśm tkaninowo-gumowych w warunkach przemysłowych w rzeczywistym czasie ich pracy, mimo licznych stwierdzeń mówiących między innymi, że wykorzystanie metod diagnostyki technicznej w eksploatacji przenośników taśmowych jest nieodzownym elementem ich racjonalnej eksploatacji [20]. Fakt ten wynika głównie ze stopnia skomplikowania ewentualnego układu monitorującego, pracującego w tych samych warunkach, co przenośnik. Jest również przyczyną braku stosownych rozwiązań konstrukcyjnych, gwarantujących wysoką skuteczność takiego systemu przy dostatecznej prostocie budowy i łatwości eksploatacji, w często dość agresywnych warunkach przemysłowych. Istotnym problemem jest też brak dostatecznej wiedzy, która w odniesieniu do znacznej zmienności właściwości taśmy, rodzajów zastosowanych połączeń oraz warunków pracy pojedynczego urządzenia, jak i całego systemu transportu taśmowego, pozwalałaby na odpowiednio skuteczne prowadzenie prac w zakresie ich projektowania i nadzoru.

Zagadnienia zapewnienia wysokiej trwałości oraz niezawodności transportu taśmowego, również w zakresie efektywnej gospodarki taśmami, dotyczą zatem istotnego problemu eksploatacyjnego systemów transportu przenośnikowego, szczególnie w odniesieniu do samej taśmy oraz jej połączeń. Biorąc pod uwagę fakt istnienia w tym obszarze tematycznym szeregu praktycznych problemów dotyczących eksploatacji przenośnikowych systemów transportowych, w niniejszej pracy podjęto się zadania analizy możliwości ich rozwiązania oraz praktycznej realizacji w zakresie doskonalenia budowy i funkcjonowania z wykorzystaniem narzędzi diagnostyki eksploatacyjnej. Osiągnięcie celów diagnostyki wymagało w tym przypadku zrealizowania wielu zadań, w tym wielowątkowych badań laboratoryjnych, prac konstrukcyjnych, pomiarów w warunkach przemysłowych oraz modelowania i symulacji numerycznych z wykorzystaniem narzędzi informatycznych. Ich celem było zgromadzenie niezbędnej wiedzy o obiekcie, o sygnałach i symptomach związanych z jego pracą oraz zidentyfikowanie wiedzy z zakresu wnioskowania diagnostycznego.

Złożoność analizowanego zagadnienia oraz wynikająca z tego potrzeba założenia kompleksowego i wnikliwego przeanalizowania wielu problemów o charakterze cząstkowym powoduje, że rozważania na temat trwałości połączeń taśmy przenośnikowej, diagnostyki tych elementów w ujęciu komputerowego wspomaganie z wykorzystaniem najnowocześniejszych metod i technik informatycznych pozyskiwania wiedzy, będące przedmiotem niniejszej rozprawy - wpisują się w bieżące potrzeby przemysłu oraz aktualne kierunki badań naukowych o charakterze aplikacyjnym.

2. Transport przenośnikowy – problematyka badawcza i eksploatacyjna

Literatura dotycząca problematyki budowy i eksploatacji przenośników taśmowych oraz prac badawczych nad ich nowymi rozwiązaniami jest różnorodna i obszerna. Dotyczy zarówno zagadnień ogólnych, związanych z problematyką i kierunkami rozwoju technologicznego systemów transportowych opartych na przenośnikach taśmowych [5, 6, 9, 10, 49, 55, 67, 68, 101, 179, 200, 209], jak i szczegółowych zagadnień związanych z doбором podstawowych parametrów przenośnika, w tym jego wydajności, siły napinającej, usytuowania napędów, liczby i wielkości silników, czy odległości między zestawami kładkowymi [5, 67, 69, 87, 209]. Oddzielna grupa pozycji literatury dotyczy problematyki badań przemysłowych nowoczesnych przenośników taśmowych [91, 110, 123, 162, 170] oraz zagadnień ich niezawodności i trwałości [64, 65, 80, 94, 124, 129, 163]. W pierwszym przypadku akcentowane jest między innymi znaczenie badań przemysłowych w projektowaniu i użytkowaniu przenośników taśmowych, ze szczególnym zwróceniem uwagi na metody pomiaru i identyfikacji wybranych parametrów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych. W drugim przypadku prace badawcze koncentrują się natomiast na ocenie ilościowych mierników niezawodności i ich wzajemnych związków, jak i na ogólnych problemach niezawodności w odniesieniu do maszyn i urządzeń eksploatowanych szczególnie w przemyśle wydobywczym, stawiającym przenośnikom taśmowym najwyższe wymagania. W każdej z podstawowych pozycji literatury o charakterze przeglądowym, a odnoszących się do problematyki transportu taśmowego, znaczna część analiz dotyczy samej taśmy przenośnikowej [5, 6, 9, 11, 21, 27, 37, 67, 69, 93, 111, 127, 129, 209], świadcząc o wyjątkowym znaczeniu prac nad konstrukcjami taśmy, ich właściwościami, doбором do warunków eksploatacyjnych, czy też dotyczących metod wykonywania połączeń odcinków taśmy i oceny ich trwałości. To wyjątkowe zainteresowanie badawcze różnymi problemami konstrukcyjnymi i eksploatacyjnymi dotyczącymi przenośników taśmowych jest znamienne. Skłoniło ono między innymi Antonia [5], do stwierdzenia, że zainteresowanie to, jak i czynniki techniczne, bezpieczeństwa i ekonomiczne wskazują jednoznacznie, że w najbliższych latach wzrastać będzie rola przenośników taśmowych, jako podstawowego elementu systemów transportu wewnątrzzakładowego, w tym w szczególności w sektorze wydobywczym, pozostawiając wciąż otwartymi szereg wyzwań o charakterze badawczym.

Jednym z takich obszarów jest problematyka trwałości połączeń taśmy przy jednoczesnej konieczności dążenia do szerszego stosowania metod diagnostyki technicznej w eksploatacji przenośników taśmowych. Ich stopień wykorzystania w tym momencie, szczególnie w dobie dynamicznego rozwoju systemów monitorowania i systemów doradczych bazujących na metodach komputerowego wspomaganie, jest wciąż niedostateczny.

Rozwój konstrukcji przenośników taśmowych związany jest zatem z dążeniem do stosowania nowocześniejszych elementów mechanicznych, zasilania i sterowania oraz budowy taśm przenośnikowych o wytrzymałości i trwałości nadążającej za rosnącymi wymaganiami przemysłu. Prowadzone w tym zakresie prace dotyczą, zatem zarówno szeregu rozważań teoretycznych, jak i aplikacyjnych. Obszar innowacji technicznych w tym zakresie odnosi się między innymi [5, 68, 91] do napędów, sterowania, zestawów nośnych, energooszczędności, niezawodności oraz trwałości taśmy i jej połączeń. Podjęte w takich przypadkach cele realizowane są za pomocą badań podstawowych, jak i nowych koncepcji, technologii, materiałów oraz przemysłowych realizacji nowoczesnych przenośników taśmowych i ich elementów. Prowadzone prace nie rozwiązują jednak wszystkich problemów dotyczących transportu taśmowego, szczególnie w kontekście problematyki diagnostyki eksploatacyjnej. Przeprowadzona w dalszej części analiza tego typu zagadnień podsumowuje aktualny stan wiedzy w tym zakresie, akcentując problemy pozostające nierozwiązanymi lub wymagającymi dalszych prac o charakterze innowacyjnym.

2.1. Przenośniki taśmowe

Za pomocą przenośników taśmowych możliwy jest szybki i wydajny transport materiałów sypkich o różnych właściwościach fizykomechanicznych, przy niskim stopniu ich degradacji w czasie przemieszczania odbywającego się często z dużą prędkością oraz na znaczne odległości [5, 8, 9, 60]. Przenośniki o ruchu ciągłym należą do mechanicznych środków transportu i wyróżniają się prostą budową, wysoką niezawodnością oraz bezpieczeństwem. Ich podstawowe cechy to między innymi wydajność wahająca się od kilkuset do kilkudziesięciu tysięcy ton na godzinę, prędkość taśmy z zakresu 1,5 do 9 m/s oraz często znaczna długość pojedynczego przenośnika wynosząca niejednokrotnie kilka kilometrów [8]. Przenośniki taśmowe coraz częściej zaczynają stanowić podstawowe elementy kilkunasto- lub nawet kilkudziesięciokilometrowych systemów transportowych o wysokiej wydajności. Fakt ten sprawia, że pojawiają się rozważania na temat granicy

możliwości rozwoju tej metody transportu, zwłaszcza w świetle aktualnych, najbardziej istotnych ograniczeń. Analizując systemy transportu taśmowego Żur [208] ocenia między innymi dalsze możliwości wzrostu wydajności poprzez zwiększenie szerokości taśmy oraz jej prędkości. Zwraca przy tym uwagę na ograniczenia wynikające z nominalnej wytrzymałości taśmy, akcentując szczególnie, że istotnym ograniczeniem jest w tym przypadku niska wytrzymałość połączeń taśmy.

Powszechną tendencją jest obecnie dążenie do stosowania długich przenośników o dużej wydajności, ponieważ dzięki ograniczeniu ich liczby w systemach transportowych uzyskuje się większą niezawodność całego systemu i większą łatwość budowy systemów automatycznej kontroli i sterowania. Jednak podstawowym ograniczeniem pozostaje w tym przypadku wybór zarówno samej taśmy (jej parametrów), jak i relacja pomiędzy wytrzymałością taśmy i wytrzymałością jej połączeń, znacznie odbiegającą od wymagań i oczekiwań eksploatacyjnych.

Znanych jest szereg różnych konstrukcji przenośników taśmowych, dostosowanych do zróżnicowanych wymagań użytkowników i przeznaczenia. Ponieważ literatura dotycząca typów, przeznaczenia i konstrukcji przenośników taśmowych jest niezwykle bogata [5, 8, 9, 58, 60, 67, 89, 123, 195, 209], dlatego też w niniejszej pracy ograniczono się jedynie do przedstawienia podstawowych informacji na ten temat, niezbędnych dla dalszych rozważań.

Głównym elementem konstrukcyjnym typowego przenośnika taśmowego jest taśma przewijająca się przez bęben zrzutowy i zwrotny. Między bębnami taśma podparta jest na szeregu zestawów krążnikowych, które wspólnie z nimi tworzą konstrukcję nośną. Przenośnik jest wprawiany w ruch za pomocą mechanizmu napędowego, w skład którego wchodzi bębny napędowe, silniki, sprzęgła itp. Dodatkowym elementem konstrukcji przenośnika jest stacja napinająca, której zadaniem jest zapewnienie odpowiedniego napięcia wstępnego taśmy oraz gromadzenie jej nadmiaru w zasobniku pętlicowym. W skład przenośnika wchodzi również urządzenia czyszczące, urządzenia zasypowe i inne, w tym systemy zabezpieczające. Istotnym zagadnieniem w projektowaniu przenośników taśmowych jest dążenie do zapewnienia maksymalnej modułowości konstrukcji, co umożliwia ich stosowanie w różnych konfiguracjach, z przeznaczeniem do różnych celów oraz branży przemysłu.

Przenośniki taśmowe mogą być klasyfikowane według różnych kryteriów [5, 8], między innymi ze względu na zastosowanie, usytuowanie części nośnej, sposób wyładunku i kształt ułożenia taśmy. Możliwa jest również klasyfikacja w odniesieniu do kąta nachylenia przenośnika do poziomu i kierunku jego transportu, ze względu na kształt trasy, rodzaj napędu, rodzaj taśmy, sposób zabudowy i przemieszczania. Dla przykładu, przyjmując za kryterium podziału typ konstrukcji zastosowanej taśmy przenośniki dzielimy między innymi na [5, 8] przenośniki z taśmą z rdzeniem tekstylnym, przenośniki z taśmą z rdzeniem z linek stalowych itp. Ostatnie z wymienionych kryterium podziału

przenośników jest dość istotne i często stosowane, co wynika z faktu, że taśma jest najdroższym i najważniejszym elementem całej konstrukcji.

2.2. Taśma przenośnikowa

W ofercie rynkowej dostępny jest szereg typów taśm przenośnikowych o różnych konstrukcjach, wymiarach, właściwościach, czy też zastosowaniach. W ofercie handlowej producentów taśm przenośnikowych dostępne są taśmy o różnej konstrukcji oraz różnych cechach eksploatacyjnych, w tym między innymi taśmy trudnopalne, zwykłe, odporne na podwyższone temperatury, z linkami stalowymi, z profilowaną stroną nośną oraz spożywcze.

Taśmy zwykłe ogólnego przeznaczenia stosowane są przeważnie do transportu materiałów sypkich i rozdrobnionych oraz ładunków jednostkowych, w temperaturach -25°C do $+60^{\circ}\text{C}$. Znajdują one zastosowanie w przenośnikach kopalń odkrywkowych do transportu nadkładu węgla, kruszyw, surowców mineralnych, w zakładach przerobczych, hutach, cementowniach, elektrowniach, portach, cukrowniach, na lotniskach, w budownictwie i wielu innych. Taśmy tkaninowo-gumowe trudno palne mają budowę podobną do wymienionych wyżej, z różnicą w wykonaniu gumy okładkowej i rdzeniowej. W tej konstrukcji taśmy wykonane one są na bazie specjalnych kauczuków i dodatków niepalniących. Ten typ taśmy przeznaczony jest dla kopalń rud metali kolorowych oraz podziemnych kopalń węgla kamiennego z zagrożeniem niebezpieczeństwem wybuchu metanu lub pyłu węglowego. Produkowane są również taśmy z profilowaną okładką nośną przeznaczone do transportu węgla, piasku, żwiru, koksu, cegieł, pustaków, worków z cementem i tym podobnych materiałów transportowanych przy zwiększonych nachyleniach. Z kolei taśmy tkaninowo-gumowe odporne na podwyższone temperatury przeznaczone są do transportu materiałów gorących o temperaturze przekraczającej $+60^{\circ}\text{C}$, (popiół, szlaka, masa formierska, kamień wapienny, klinkier cementowy, koks, saletra amonowa, mocznik, sole potasowe). Dla warunków wymagających znacznie większej wytrzymałości, produkowane są taśmy z linkami stalowymi lub z siatką stalową. Dla przykładu, taśmy z rdzeniem z siatki stalowej charakteryzują się wysoką odpornością na przecięcia i przebicia i nadają się w związku z tym do pracy w trudnych warunkach kopalń surowców skalnych (pod wysypem z kruszarek), w składnicach złomu itp. Specjalnym rozwiązaniem są też taśmy tkaninowo-gumowe przeznaczone dla przemysłu spożywczego. Znajdują one zastosowanie w przetwórstwie warzyw i owoców, w przechowalniach, w chłodniach,

w przetwórstwie mięsnym i rybnym. Guma okładek tych taśm z racji kontaktu z żywnością musi posiadać świadectwo jakości zdrowotnej [195].

Typowa taśma tkaninowo-gumowa wieloprzekładkowa ma rdzeń złożony z kilku (2 do 6) warstw tkaniny technicznej zaimpregnowanej środkiem zwiększającym przyczepność gumy do tkaniny. Między poszczególnymi przekładkami znajduje się guma rdzeniowa. Liczba przekładek i ich rodzaj decyduje o wytrzymałości taśmy. Przekładka składa się z nici osnowy ułożonych równolegle do osi wzdłużnej taśmy oraz nici poprzecznych wątków. Materiał na tkaniny to najczęściej poliamid, poliester, bawełna lub wiskoza. Rdzeń zapewniający taśmie parametry wytrzymałościowe chroniony jest okładką nośną współpracującą z transportowanym materiałem oraz okładką bieżną kontaktującą się z krążnikami nośnymi [8, 9, 195]. Podstawowymi elementami taśmy tkaninowo-gumowej są, zatem rdzeń będący nośnikiem wytrzymałości taśmy oraz okładki i obrzeża. Okładki taśm mogą być wykonywane z gumy o różnych klasach i właściwościach.

Tak duże zróżnicowanie typów taśm, ich parametrów i przeznaczenia sprawia, że konieczne jest ich odpowiednie dobranie do zakładanych warunków pracy i przyszłego obciążenia. Taśmę przenośnikową dobiera się zatem tak, aby mogła z odpowiednim współczynnikiem bezpieczeństwa przenieść duże siły rozciągające, występujące w różnych stanach pracy przenośnika. Konstrukcja taśmy i materiały, z jakich jest wykonana nadają jej określone cechy fizyko mechaniczne, które muszą być odpowiednie dla zadanego przenośnika, rodzaju transportowanego materiału, warunków pracy i typu środowiska, w jakim będzie eksploatowana. Taśma przenośnikowa powinna być, zatem odpowiednio elastyczna, aby mogła się poprawnie układać na zestawach krążnikowych. Musi również charakteryzować się wysokim współczynnikiem tarcia między taśmą a bębniem napędowym oraz odwrotnie – niską jego wartością między taśmą i transportowanym materiałem. Ponieważ taśmy przenośnikowe mogą mieć różne konstrukcje, szerokości, wytrzymałości, grubości okładek, właściwości gumy oraz przekładkę ochronną lub też specjalny profil okładki nośnej, dlatego też dla ich poprawnego użytkowania skutkującego odpowiednią trwałością, niezbędne jest właściwe dobranie taśmy [5, 8, 9, 195, 209].

Większość z właściwości taśm przenośnikowych może być określona w trakcie odpowiednich badań, testów i obliczeń obejmujących między innymi oznaczenie wytrzymałości taśmy przenośnikowej na rozciąganie i wydłużenie przy zerwaniu, określenie wytrzymałości na wrywanie linki stalowej z gumy i na odwarstwienie okładek gumowych oraz oznaczenie odporności taśmy na ścieranie wraz z oceną sztywności poprzecznej. Sam dobór taśmy może być również dokonany z wykorzystaniem narzędzi informatycznych, które wymagają jedynie wprowadzenia odpowiednich danych wejściowych obejmujących między innymi wysokość spadku materiału na taśmę, wysokość podnoszenia, kąt nachylenia przenośnika itp. Odrębny problem

to łączenie taśm gwarantujące utrzymanie przenośnika taśmowego w stanie zdadności zadaniowej.

2.2.1. Metody łączenia taśm przenośnikowych

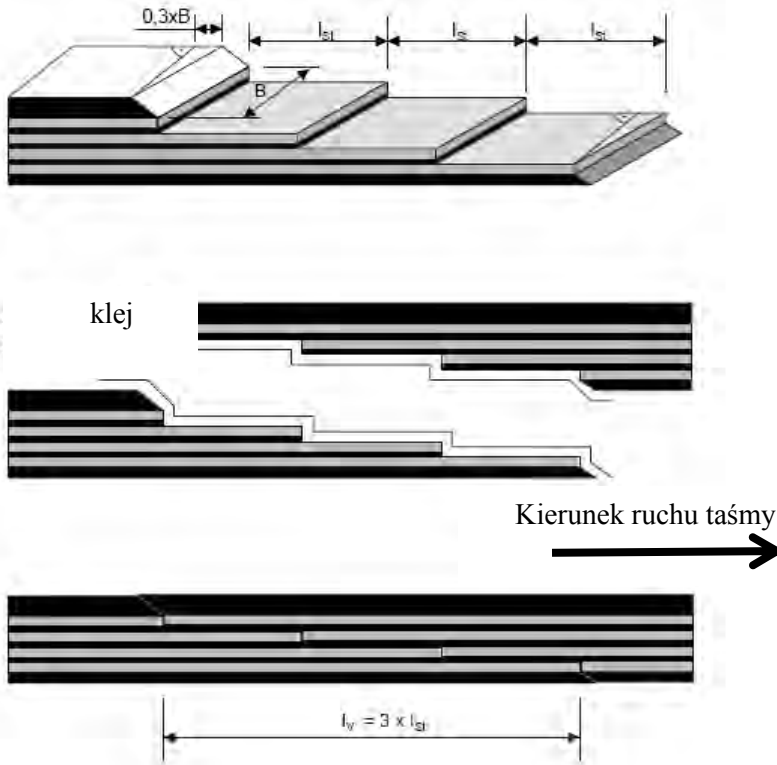
Taśmy przenośnikowe produkuje się w odcinkach o określonej długości, które następnie muszą być połączone razem w całość, aby utworzyć ciągnio bez końca. Długości odcinków taśm nie są znormalizowane i zależą wyłącznie od życzenia odbiorcy. Ich maksymalna długość jest jednak ograniczona masą lub średnicą zwoju. Standardowe długości odcinków taśm wynoszą [8, 195]: 50, 100, 150, 200, 250 lub 300 metrów.

Rodzaj rdzenia taśmy i materiały, z których jest ona wykonana wymagają odpowiednich konstrukcji, materiałów oraz technologii wykonania złącza. W tym przypadku wieloletnie doświadczenie sprawiło, że opracowane zostały standardy, teoretycznie gwarantujące odpowiednią wytrzymałość doraźną i zmęczeniową połączeń taśm [8, 23, 195]. I tak - do łączenia taśm z rdzeniem z linek stalowych stosuje się wyłącznie metodę wulkanizacji. Z kolei taśmy tkaninowo-gumowe łączy się jedną z trzech metod: metodą wulkanizacji, metodą klejenia oraz z zastosowaniem mechanicznych elementów złącznych. Wykonane jedną z wymienionych wyżej metod połączenia taśm przenośnikowych powinny mieć jak najwyższą wytrzymałość na rozciąganie. Jednak, jakość połączenia zależy od szeregu czynników, w tym od stanu łączonych końcówek taśm, właściwego doboru materiałów do łączenia oraz doświadczenia i staranności osób wykonujących złącze, często odbiega od przyjętych założeń oraz parametrów teoretycznych. Przykładowo, zakres wartości uzyskiwanych wytrzymałości połączeń klejowych jest większy, a trwałość mniejsza, niż w przypadku zastosowania do wykonania złącza metody wulkanizacji.

Połączenia mechaniczne taśm mogą być klasyfikowane, jako rozłączne i nierozłączne. Do ich wykonania stosuje się między innymi haki pojedyncze lub podwójne, połączenia zawiasowe klamrowe i zawiasowe złączkowe oraz wiele innych, dobieranych stosownie do wytrzymałości taśmy, jej grubości, średnicy bębnow przenośnika, czy też w zależności od posiadanego oprzyrządowania do ich wykonywania lub przewidywanej trwałości [8, 90, 195]. Połączenia mechaniczne są zwykle stosowane w przenośnikach, które wymagają rozłączania taśmy, lub w sytuacji, gdy niezbędne jest wykonanie szybkiego, doraźnego połączenia odcinków taśmy. Ta druga okoliczność ma miejsce w przypadku awarii i związanej z nią konieczności tymczasowej naprawy lub wykonania połączenia na czas do przeprowadzenia pełnej procedury klejenia

lub wulkanizacji. Są to, zatem połączenia do taśm o niskiej i średniej wytrzymałości na rozciąganie oraz małej szerokości. W przypadku taśm o dużej wytrzymałości stosowane są jedynie, jako połączenia awaryjne.

Z tych powodów taśmy przENOŚnikowe łączy się najczęściej przez zastosowanie wulkanizacji lub klejenia. Łączenie taśm tymi metodami jest czynnością pracochłonną, jednak zapewniającą wysoką wytrzymałość połączenia. Wulkanizacja jest metodą stosowaną do wszystkich typów taśm, przy czym jako jedyna dopuszczalna, jak wspomniano wcześniej - dla taśm z linkami stalowymi.



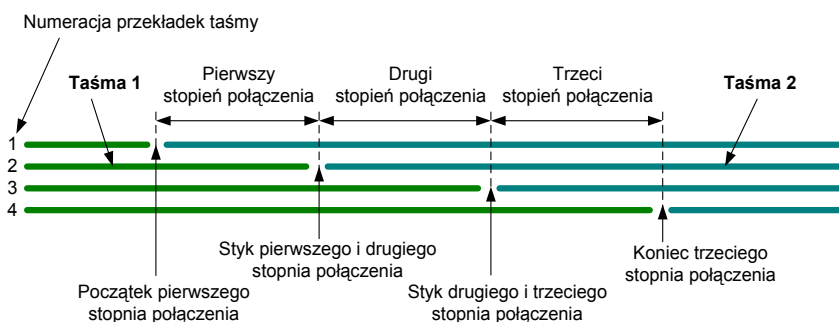
Rys. 2.1 – Schemat sposobu wykonywania złącza taśmy czteroprzekładkowej [190]

Wymaga ona niestety posługiwania się specjalnym, stosunkowo ciężkim i nieporęcznym sprzętem, a czas wykonania takiego połączenia jest dość długi.

W górnictwie podziemnym do łączenia taśm wieloprzekładkowych stosuje się złącza stopniowe zakładkowe (rys. 2.1), których stopnie połączenia oznaczane są zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 2.2.

Wulkanizację stosuje się zwykle przy pierwszej instalacji nowych taśm przenośnikowych, natomiast za klejeniem przemawiają niskie koszty oraz łatwość wykonania w zwykle trudnych warunkach [95].

W każdej z publikacji dotyczącej problematyki budowy i eksploatacji przenośników taśmowych zawsze znajdziemy rozdziały dotyczące metod łączenia taśmy i związanego z tym obniżenia jej wytrzymałości i trwałości. Dla przykładu – Żur i Hardygóra [209] analizując między innymi wpływ uszkodzeń taśmy i konstrukcji połączenia na wytrzymałość taśmy, uznają obszar złącza za najsłabsze ogniwo taśmy pracującej na przenośniku, od którego parametrów wytrzymałościowych zależy niezawodna praca całego urządzenia transportowego. Innymi słowy – wytrzymałość taśmy zabudowanej na trasie przenośnika będzie taka, jak wytrzymałość najsłabszego jej połączenia.



Rys. 2.2 – Schemat sposobu numeracji przekładek oraz stopni połączenia taśmy czteroprzekładkowej

Łączenie taśm to, zatem dość istotne zagadnienie i jednocześnie problem dla osób zajmujących się eksploatacją przenośników, które wymagają ciągłego skracania, wydłużania, czy też relokacji, co wiąże się z nieustannym wykonywaniem nowych połączeń, nie tylko będących efektem czynności serwisowych. Szczególna waga tego zagadnienia wynika z rosnącej liczby długich przenośników transportujących z dużą prędkością znaczne masy różnego rodzaju materiałów, ale też związana jest z dużą ilością wykonywanych w każdym roku nowych połączeń taśm. Jak podaje FTT Stomil Wolbrom S.A. [195], obecnie w ciągu roku serwis tej firmy wykonuje średnio ponad 1000 połączeń taśm w kraju i za granicą.

2.2.2. Wytrzymałość teoretyczna połączeń taśm przerośnikowych

Jak wynika między innymi z badań prowadzonych przez Hardygórę [80], z konstrukcją połączenia wiąże się osłabienie wytrzymałości taśmy w miejscu łączenia. W taśmie wieloprzekładowej wskutek przeniesienia obciążenia z przekładki przeciętej na przekładki sąsiednie, naprężenia w najbliższej przekładce mogą wzrosnąć o 60-100%, w wyniku, czego zerwanie taśmy w obszarze złącza następuje przy odpowiednio mniejszym obciążeniu niż zerwanie taśmy pierwotnej. Różnice wartości wytrzymałości na zrywanie taśmy i jej połączeń są często znaczne, co w głównej mierze zależy od zastosowanej metody łączenia. Nie bez znaczenia jest tutaj jednak wpływ szeregu niemierzalnych czynników, które są w większości przypadków odpowiedzialne za nieprzewidziane zerwanie taśmy w obszarze złącza.

W przypadku zastosowania połączeń mechanicznych muszą one wykazywać wytrzymałość względną nie mniejszą niż 60% nominalnej wytrzymałości taśmy na zerwanie. Muszą także zapewnić prawidłową współpracę z elementami przerośnika [8]. W przypadku, gdy połączenia odcinków taśmy wykonywane są metodą wulkanizacji, wytrzymałość złącza określana jest w sposób teoretyczny zgodnie z zależnością [155]:

$$R_p \geq 0,85 \cdot R_r \cdot \frac{z-1}{z}, \quad (2.1)$$

gdzie: z – liczba przekładek, R_p – wytrzymałość połączenia na rozciąganie, R_r – wytrzymałość taśmy na rozciąganie.

W przypadku połączeń wulkanizowanych i klejowych taśm tkaninowo-gumowych stosowane są złącza stopniowe zakładkowe, których teoretyczna wytrzymałość wynosi zatem dla trzech przekładek 67%, dla czterech 75%, dla pięciu 80% i dla sześciu 84% wytrzymałości nominalnej taśmy. Z kolei taśmy z linkami stalowymi łączy się tylko metodą wulkanizacji, a teoretyczna wartość wytrzymałości na rozciąganie typowego trzystopniowego połączenia takiej taśmy wynosi od 90 do 95% wytrzymałości nominalnej [8]. Teoretyczne wartości wytrzymałości złączy na zrywanie weryfikowane są w warunkach laboratoryjnych. Połączenia taśm przerośnikowych badane są wtedy metodami statycznymi lub dynamicznymi [153-156, 158, 160, 161]. Metody statyczne polegają na określeniu wytrzymałości na rozciąganie próbki taśmy wraz ze złączem podczas próby zrywania. Wyniki badań statycznych charakteryzują się jednak dużym zróżnicowaniem. Wynika z nich między innymi, że dla

przykładu nowoczesne połączenia rozłączne mechaniczne mają wytrzymałość na zerwanie równą od 50% do 75% wytrzymałości nominalnej taśmy [90], aczkolwiek podana wartość procentowa jest ściśle związana z wytrzymałością samej taśmy. Dla taśm o niższych wytrzymałościach osiąga wyższe wartości i odwrotnie – niższe dla taśm o wyższych wytrzymałościach.

Metody dynamiczne polegają natomiast na pulsacyjnym obciążaniu próbki taśmy z wykonanym połączeniem, przewijającej się przez dwa bębny zwrotne. Warunki badań połączeń taśm przENOŚNIKOWYCH określone są przez odpowiednie normy. Badania te są jednak dość utrudnione, ponieważ wymagają stosowania specjalnych urządzeń, w tym poziomych maszyn wytrzymałościowych, posiadających możliwość zerwania próbki złącza z otaczającym je fragmentem taśmy, o znacznej długości oraz dość dużej wartości wydłużenia w chwili zerwania. Nowe typy taśm oferowane przez producentów, w tym taśm o coraz większej wytrzymałości na zrywanie (aramidowe taśmy kordowe, taśmy z linkami stalowymi itp.) sprawiają, że coraz większe wymagania stawiane są również połączeniom. Wzrost wartości ich wytrzymałości na zrywanie nie jest, bowiem wprost proporcjonalny do ciągle rosnących wartości wytrzymałości nominalnej nowych typów taśm. Jednak mimo szeregu lat doświadczeń w wykonywaniu i stosowaniu zróżnicowanych konstrukcji połączeń, nadal to złącza właśnie stanowią istotną barierę dla pełnego wykorzystania ciągle rosnących wartości nominalnych wytrzymałości taśmy. Fakt ten wymusza konieczność poszukiwania nowych rozwiązań konstrukcyjnych i metod łączenia taśm, albo też opracowania skutecznej metody ich monitorowania i diagnozowania w czasie pracy.

2.2.3. Problematyka eksploatacyjna i badawcza taśm przENOŚNIKOWYCH i ich połączeń

Problematyce połączeń taśm przENOŚNIKOWYCH, jak i samym taśmom poświęconych jest wiele prac badawczych prowadzonych w większości przypadków na przestrzeni ostatnich dziesięcioleci, oraz towarzyszących im licznych publikacji. Dotyczą one zarówno ogólnej problematyki technicznej przENOŚNIKÓW taśmowych, opartych na nich konstrukcji systemów transportowych, jak i szczegółów konstrukcyjno-projektowych i eksploatacyjnych. Część z tych publikacji to między innymi znaczące pozycje o kompleksowym spojrzeniu na problematykę transportu przENOŚNIKAMI taśmowymi autorstwa Antoniaka [5, 8], Żura i Franasika [60] oraz Żura i Hardygóry [209]. Inne prace badawcze i bazujące na nich monografie dotyczą bardziej szczegółowych zagadnień, w tym teorii i obliczeń przENOŚNIKÓW

taśmowych [67], zagadnień badań przemysłowych nowoczesnych konstrukcji przeniósniów [69], czy też problematyki ich niezawodności i trwałości [163], również w odniesieniu do wpływu warunków użytkowania taśm na niektóre ich właściwości mechaniczne [125]. Zagadnieniom transportu taśmowego poświęcane są również liczne konferencje naukowe, sympozja i cykliczne prace naukowe, stałe rozdziały w wydawnictwach periodycznych [6, 20, 21, 29, 48, 49, 81, 88-90, 97, 101, 111, 174, 180, 193] oraz badania prowadzone w ramach przygotowywania rozpraw doktorskich i habilitacyjnych. Dotyczą one w większości przypadków samych taśm, a w niektórych, choć dość nielicznych analizach – odnoszą się również do problematyki ich połączeń.

Jednymi z nich są prace badawcze Madziarza [129], w trakcie których koncentrowano się między innymi na analizie wpływu konstrukcji i technologii wykonania połączeń tkaninowych taśm przeniósniowych na ich wytrzymałość. Bazowano przy tym na analizie przyczyn uszkodzeń połączeń taśm podczas eksploatacji w warunkach przemysłowych konkretnych przeniósniów [127]. W ich trakcie stwierdzono między innymi, że 25% całkowitej liczby zarejestrowanych w analizowanym okresie uszkodzeń połączeń taśm tkaninowych stanowią rozwarstwienia, co świadczy o niedostatecznej sklejenności spoiny połączenia. W trakcie przeprowadzonych badań laboratoryjnych stwierdzono również, że obniżenie wytrzymałości połączeń w większości przypadków było wynikiem wad wykonawczych, w tym nacięcia przekładek oraz niedokładnego przygotowania powierzchni poszczególnych stopni – nawarstwienia gumy frykcyjnej lub nadmiernego oczyszczenia z gumy powierzchni odsłoniętych przekładek. Dostrzegając istotę problemu obniżenia wytrzymałości złączy wobec możliwego do osiągnięcia poziomu dla stosowanych konstrukcji i materiałów łączących, wynikającego z szeregu trudnych do uniknięcia błędów wykonawczych, Madziarz [129] podejmuje próbę opracowania modelu matematycznego połączenia taśmy wieloprzekładekowej z weryfikacją otrzymanych wyników przy pomocy badań elastooptycznych. Istotą takich badań jest wykonanie modeli połączeń, w których warstwę gumy zastąpiono materiałem optycznie czułym. Badania elastooptyczne modeli połączeń taśm umożliwiły w tym przypadku bezpośrednią rejestrację zaburzeń rozkładu naprężeń stycznych w warstwie międzyprzekładekowej połączenia. W tym, jak i w szeregu innych przypadków, próby ilościowej oceny i identyfikacji naprężeń w taśmie i w obszarze złącza wykonywane metodami elastooptycznymi, jak i tensometrycznymi nie dają jednak dostatecznie zadowalających wyników. Fakt ten znajduje swoje potwierdzenie w pracy [21], gdzie stwierdzono między innymi, że ze względu na różnicę właściwości mechanicznych materiału elastooptycznego i gumy międzyprzekładekowej, niewielką grubość badanych modeli połączeń, mały zakres zastosowanych obciążeń oraz specyfikę badań elastooptycznych, odniesienie na przykład obliczonych wartości współczynników karbu do wielkości naprężeń

występujących w rzeczywistych warunkach jest zagadnieniem niezwykle złożonym.

Podobnej problematyki dotyczy również praca Błażeja [27], w której zwrócono uwagę, że podstawowym zagadnieniem w projektowaniu przenośników taśmowych jest odpowiedni dobór taśmy, a z kolei główne kryterium takiego doboru to wytrzymałość połączenia. W pracy [27] przyjęto założenie, że podstawowym parametrem decydującym o wytrzymałości połączenia wieloprzekładowego taśmy tkaninowo-gumowej są naprężenia ścinające w warstwach gumy międzyprzekładowej. Celem pracy była w tym przypadku identyfikacja naprężeń w spoinie klejowej i próba określenia zależności pomiędzy tą wielkością, a właściwościami mechanicznymi rdzenia taśmy. Rozkład wydłużeń i naprężeń w spoinie klejowej zidentyfikowano w tym przypadku za pomocą pomiaru kąta odkształcenia postaciowego.

W analizie trwałości niezbędne jest również prowadzenie badań w obszarze tematycznym wytrzymałości zmęczeniowej. Prace takie realizowane były między innymi przez Ciszewskiego [37], który podjął próbę identyfikacji parametrów wpływających na wytrzymałość zmęczeniową wieloprzekładowych taśm przenośnikowych. W pracy tej, bazującej również na analizie przyczyn zużycia taśm przenośnikowych eksploatowanych w wybranych przedsiębiorstwach [127], analizowano między innymi problem rozwarstwiania się taśm. Na podstawie badań laboratoryjnych oceniano również wpływ cech wytrzymałościowych warstw taśmy na jej wytrzymałość zmęczeniową. Głównym celem badawczym pracy była w tym przypadku weryfikacja zastosowanej metody badań laboratoryjnych w analizie wpływu parametrów materiałowych i geometrycznych warstw taśmy na jej wytrzymałość zmęczeniową. W rozprawie wykazano, że występuje korelacja pomiędzy wytrzymałością zmęczeniową, a analizowanymi parametrami, w tym ze statyczną wytrzymałością na ścinanie warstwy międzyprzekładowej, wytrzymałością na rozwarstwienie, wytrzymałością na rozciąganie przekładek w kierunku osnowy [37].

W każdej z analizowanych publikacji i prac badawczych [5, 8, 27, 29, 49, 60, 81, 88, 129, 193, 209] stwierdza się niezmiennie, że zagadnienie trwałości i niezawodności przenośników taśmowych, w tym odnoszące się do samej taśmy i jej połączeń – jest kluczowym problemem eksploatacyjnym systemów transportu ciągłego. Ocenia się również, że nadal istnieją znaczne możliwości obniżenia kosztów eksploatacji przy zapewnieniu odpowiedniej niezawodności elementów analizowanego systemu transportu. Jednym z najważniejszych celów prowadzonych prac badawczych w tym zakresie jest, bowiem obniżenie kosztów transportu w powiązaniu ze zwiększeniem niezawodności pracy systemów transportowych. Obszar poszukiwania takich potencjalnych korzyści ekonomicznych, które odniesione do kosztu zakupu, naprawy, czy wymiany taśmy lub jej połączeń są niebagatelne, leży między innymi w dziedzinie racjonalnej gospodarki taśmami. Racjonalna gospodarka możliwa jest w tym przypadku

między innymi dzięki opracowaniu metody określenia rozkładu pracy taśmy przerośnikowej i jej wykorzystania do prognozowania momentu wymiany taśmy. Stosownie do takiego założenia w pracy [93] przeprowadzono między innymi przegląd problematyki badawczej poświęconej analizie wpływu eksploatacji na właściwości fizykomechaniczne taśmy przerośnikowej. Wynika z niej, że wiedza o tym jak szybko i do jakich wartości następuje spadek parametrów wytrzymałościowych taśmy w czasie jej użytkowania jest niezbędna dla poprawnego doboru taśmy dla danego przerośnika. Jest ona też istotna dla określenia optymalnego momentu wykonania czynności serwisowych. Autor pracy [93] przedstawia propozycję modelu matematycznego pozwalającego na analityczne określenie postaci rozkładu czasu pracy taśmy przerośnikowej. Zaproponowany model jest jednak pewnego rodzaju uproszczeniem, ponieważ odnosi się do odcinka taśmy (od złącza do złącza), pozostawiając nierozstrzygniętym problem związku czasu pracy pojedynczego odcinka taśmy z trwałością całej pętli. Wśród wniosków pracy na szczególną uwagę zasługuje stwierdzenie autora [93], że z uwagi na zainteresowanie przedsiębiorstw użytkujących systemy transportu taśmowego prognozami zapotrzebowania na taśmy poszczególnych producentów, typów oraz rodzajów, konieczne jest prowadzenie analizy wykorzystującej dane o rozkładach czasów pracy odcinków taśmy. Jako potencjalne rozwiązanie zaproponowano szczegółową prognozę opartą o symulację numeryczną momentów wymiany dla każdego z odcinków z osobna, z uwagi na fakt, że metody analityczne i symulacja wymiany taśm w odniesieniu do całych pętli są zbyt ogólne i mało dokładne. Otrzymane wyniki analiz statystycznych rozkładu czasu pracy odcinków taśm zostały poddane weryfikacji na podstawie danych pochodzących z reprezentatywnego przedsiębiorstwa, zgromadzonych na przestrzeni kilkunastu miesięcy. Pominięto przy tym fakt potencjalnej możliwości prowadzenia stałej analizy czasu pracy i obciążenia zarówno poszczególnych odcinków taśmy, jak i ich połączeń z wykorzystaniem odpowiednio zaprojektowanego do tego celu komputerowego systemu pomiarowego, co z tego względu było między innymi jednym z założeń cząstkowych prac opisywanych w niniejszej rozprawie. Nieco inne spojrzenie na problem wpływu czasu eksploatacji taśmy przerośnikowej na zmianę jej niektórych właściwości mechanicznych proponują natomiast autorzy pracy [65], opierając swoją analizę na odpowiednim modelu reologicznym wykorzystanym do opisu zachowania się taśmy przerośnikowej.

Znaczna część połączeń taśm przerośnikowych cechuje się niską wytrzymałością i trwałością z powodu chociażby trudnych do uniknięcia błędów wykonawczych [29, 88, 140-142]. Jedną z możliwości zwiększenia trwałości taśmy i jej połączeń jest między innymi obniżenie wartości naprężeń wzdłużnych w taśmie. Jak podaje Jabłoński [86, 91] – badania trwałości zmęczeniowej połączeń wskazują na silny wpływ naprężeń wzdłużnych w taśmie na jej trwałość i wytrzymałość. Dlatego też prowadzone są w związku z tym liczne prace konstrukcyjne, których celem jest opracowanie odpowiednich

rozwiązań urządzeń napinających. Drugim potencjalnym kierunkiem badań w tym przypadku jest dążenie do zwiększenia trwałości i wytrzymałości połączeń taśm w efekcie prowadzenia analizy i oceny rozkładu naprężeń w złączu oraz wpływu na nie samej konstrukcji połączenia. Szczególnie istotnym problemem jest tu między innymi prawidłowe określenie trwałości połączenia w odniesieniu do czynników mających na nią wpływ. W warunkach przemysłowych główną przyczyną wymiany taśmy lub złącza jest utrata wytrzymałości rdzenia taśmy lub jej połączenia poniżej granicy uznanej za dopuszczalną. Wynika z tego konieczność przeciwdziałania jednej z najczęściej występujących przyczyn awarii taśmy przENOŚnikowej, jaką jest obniżenie jej wytrzymałości w efekcie zmęczeniowego uszkodzenia. Dlatego też od kilku lat prowadzone są również prace badawcze mające na celu określenie wytrzymałości doraźnej i zmęczeniowej połączeń taśm przENOŚnikowych, koncentrujące się między innymi na teoretycznej identyfikacji naprężeń w obszarze połączenia. Nie bez znaczenia jest tu również fakt, że nierównomierny rozkład naprężeń w połączeniu powoduje także nieprostoliniowość biegu taśmy [209]. Identyfikacja naprężeń w spoinie klejowej pozwala zatem na odpowiednie jej modelowanie konstrukcyjne, dobór materiałów, ich właściwości oraz sposobu wykonania połączenia.

Z powodu złożoności budowy taśmy oraz jej połączenia wieloprzekładowego, jak i trudności w poprawnym zamodelowaniu właściwości poszczególnych warstw o charakterystyce często nieliniowej, opracowywane modele zawierają szereg uproszczeń. Towarzyszące im z kolei weryfikujące badania laboratoryjne prowadzone są często w sposób dość pobieżny i wrywkowy, co z kolei wynika z opisanych wcześniej trudności technicznych, konieczności posiadania specjalistycznego sprzętu laboratoryjnego oraz związanych z tym bardzo wysokich kosztów, stanowiących podstawowe w tym przypadku ograniczenie. Jak zauważa między innymi Błażej [27], ocena jakości zarówno taśmy, jak i złącza klejowego, nie stanowi wprawdzie większego problemu w warunkach laboratoryjnych, lecz dla odmiany odpowiedni dobór elementów połączenia (jego rodzaj, właściwości stosowanych materiałów) poparty szczegółową analizą zjawisk zachodzących w spoinie, szczególnie w ujęciu zmęczeniowym jest wciąż zagadnieniem bardzo trudnym i nierozwiązanym. Pomocna w tym przypadku może okazać się analiza numeryczna z wykorzystaniem metody elementów skończonych (MES) – będącej najszerzej stosowaną metodą komputerowego wspomaganie obliczeń i analiz inżynierskich w mechanice [151]. Metoda ta wprawdzie z powodzeniem stosowana jest w badaniach nad połączeniami klejowymi, szczególnie dotyczącymi klejenia materiałów metalowych, to jednak dotychczas tylko pojedyncze prace badawcze wykorzystujące modelowanie MES dotyczą prób oceny i analizy zjawisk zachodzących w obszarze połączenia taśm przENOŚnikowych. Wynika to z szeregu wiążących się z tym problemów, uniemożliwiających uzyskanie wiarygodnych i powtarzalnych wyników,

jak między innymi zdefiniowanie odpowiednich modeli materiałowych poszczególnych warstw taśmy i złącza, wprowadzających do obliczeń znaczące efekty nieliniowe.

Zastosowanie MES do analizy naprężeń w obszarze połączenia odcinków taśmy przeniósniowej jest między innymi elementem badań prowadzonych przez Błażeja [27], których celem było porównanie wartości wydłużeń i naprężeń w spoinie klejowej określonych z zastosowaniem rejestracji video. Przeprowadzona w tym celu analiza numeryczna obejmowała opracowanie odpowiedniego modelu geometrycznego oraz odpowiadającego mu modelu dyskretnego taśmy przeniósniowej, określenie obciążeń zewnętrznych działających na taśmę oraz przeprowadzenie obliczeń numerycznych. Obliczenia numeryczne prowadzone były z zamiarem wyznaczenia naprężeń i wydłużeń w obszarze złącza taśmy przeniósniowej, dla różnych, analizowanych w badaniach zestawień tkanin i mieszanek gumowych. Jednak jak zauważa sam autor [27], otrzymane wyniki są wstępne i przybliżone, a dokładniejsze wartości wydłużeń i naprężeń byłyby możliwe do uzyskania w przypadku wykorzystania w analizie rzeczywistych, określonych na drodze badawczej wartości parametrów wytrzymałościowych materiałów składowych połączenia, zamiast współczynników przyjętych z pewnym przybliżeniem. W opisywanych wcześniej badaniach, w sposób przybliżony, obarczony dodatkowymi błędami wpływającymi na ostateczny efekt modelowania, określone zostały bowiem niezwykle istotne dla końcowego wyniku stałe materiałowe i ich charakterystyki wytrzymałościowe. Nie bez znaczenia jest również poprawne zamodelowanie połączenia zgodnie z zasadami metody elementów skończonych, w tym dobór odpowiednich elementów i ich powiązań, metody modelowania, gęstości siatki itp. Tu również sam autor [27] stwierdza, że zarejestrowane błędy w trakcie interpretacji wyników modelowania są efektem niedoskonałości w budowie modelu – niedostateczna była bowiem gęstość siatki, wynikająca prawdopodobnie z ograniczonych możliwości obliczeniowych.

Metoda elementów skończonych w pracach badawczych dotyczących taśm przeniósniowych i ich złączy była wykorzystywana również przez Kuzmienko i Kiriaz'eva [111], którzy zwracają między innymi uwagę na konieczność prowadzenia zaawansowanych prac nad nowymi, wysokowytrzymałymi konstrukcjami połączeń odcinków taśmy przeniósniowej z zastosowaniem metod symulacji numerycznych. W swoich badaniach oceniali oni rozkład naprężeń i odkształceń w obszarze złącza taśmy czteroprzekładowej. Również w tej pracy z dużym uproszczeniem jednak definiowane były parametry wytrzymałościowe materiałów wchodzących w skład złącza, co w znaczący sposób obniża jakość otrzymanych wyników.

Ta niewielka liczba zarejestrowanych w bazach bibliotecznych prac, których zadaniem było opracowanie modelu MES połączenia klejowego taśmy przeniósniowej, w porównaniu ze znaczącą liczbą podobnych publikacji

odnoszących się na przykład do materiałów metalowych jest znamienna. Podobnie jest w przypadku problemu optymalizacji połączeń klejowych ze względu na kryterium jakościowe z wykorzystaniem tej metody [17, 40, 41, 167, 187]. Tymczasem zadanie modelowania połączenia klejowego z wykorzystaniem technik komputerowych pozwala oczekiwać wiarygodnych i interesujących wyników, całkowicie lub częściowo rozwiązujących aktualne problemy badawcze [17, 22, 39, 42, 43, 50, 61, 63, 66, 74, 79, 99, 107, 108, 114, 119, 176, 181, 187, 191]. Jest to niezwykle istotne zagadnienie z racji konieczności posiadania wiedzy w zakresie na przykład rozwiązywania problemów odpowiedniego użycia właściwego kleju i parametrów połączenia w celu uzyskania optymalnych właściwości i cech eksploatacyjnych złącza.

We wszelkiego rodzaju konstrukcjach, w których jako metodę łączenia elementów zastosowano klejenie – trwałość połączenia powinna być traktowana jako jeden z podstawowych wskaźników ich przydatności eksploatacyjnej. Niestety, jak zauważają Godzimirski i Rośkiewicz [72], problematyka trwałości połączeń klejowych jest niemal całkowicie pomijana przez producentów klejów. Nie inaczej jest również w przypadku klejów kauczukowych stosowanych w połączeniach taśm przENOŚNIKOWYCH. Brak jest tu stosownych analiz, publikacji i badań określających, w jaki sposób parametry kleju, geometria połączenia i tym podobne cechy wpływają na trwałość połączenia. Jest to jednym z powodów, dlaczego teoretyczne wartości wytrzymałości na rozciąganie połączeń klejowych taśm przENOŚNIKOWYCH i ich rzeczywiste wartości wciąż mocno od siebie odbiegają. Potencjalnym rozwiązaniem tego problemu jest poszukiwanie niezbędnych do tego celu informacji poprzez przeprowadzenie analizy rozkładu naprężeń i odkształceń w obszarze połączenia z zastosowaniem metod numerycznych. Można tu, bowiem oczekiwać, że identyfikacja naprężeń i odkształceń w spoinie klejowej pozwoli na odpowiednie jej zaprojektowanie, dobór materiałów składowych i ich właściwości oraz umożliwi określenie sposobu wykonania połączenia w kontekście czysto konstrukcyjnym. Stosowna analiza może być wykonana za pomocą modelowania numerycznego z zastosowaniem klasycznej metody elementów skończonych. Związki pomiędzy siłami i przemieszczeniami są w niej wyrażone za pomocą macierzy sztywności, której elementy składowe zawierają stałe materiałowe opisujące właściwości mechaniczne modelowanych materiałów. Niepoprawne lub niedokładne ich zdefiniowanie jest podstawową przyczyną błędów i rozbieżności w wynikach prowadzonych analiz. Szczególnie istotne jest to w przypadku modelowania połączenia taśmy przENOŚNIKOWEJ, składającej się z różnych typów gumy, przekładek tkaninowych oraz kauczukowego kleju łączącego. Poddawana wulkanizacji mieszanka gumowa składa się z kauczuków oraz różnego rodzaju dodatków kształtujących jej późniejsze właściwości. Dodatkami mogą być w tym przypadku przyspieszacze i aktywatory wulkanizacji, plastyfikatory, napelniacze, substancje przeciwstarzeniowe oraz barwiące, substancje porotwórcze i inne.

Przykładowo, wraz ze wzrostem udziału w mieszance napelnacza [36, 44, 172], rośnie jej wytrzymałość na ścieranie i moduł sprężystości, ale też jednocześnie maleje wytrzymałość na rozciąganie. Zmniejsza się również wartość wydłużenia, przy którym dochodzi do rozerwania próbki.

Guma, jako podłoże do klejenia i jednocześnie materiał konstrukcyjny jest więc specyficznym materiałem, którego właściwości mogą być dość zróżnicowane w zależności od składu, zawartości dodatków itp. Z tego też względu, a dodatkowo również w wyniku niewielkiej współzależności (lub nawet jej braku) między metodami badań laboratoryjnych i warunkami eksploatacji, poszukiwane są nowe, bardziej odpowiednie metody badań, analiz oraz modelowania konstrukcji z materiałów gumowych [92], o poprawnie zamodelowanych parametrach wpływających na właściwości wytrzymałościowe. Jest to o tyle istotne, że opisanym wyżej powodem niedokładności, małej wiarygodności lub braku możliwości porównania i oceny wyników analizy modelowania MES połączeń klejowych, jak i innych prac badawczych o podobnym charakterze jest przyjmowanie przybliżonych wartości współczynników wytrzymałościowych modelowanych materiałów, zamiast wykorzystania w analizie rzeczywistych, określonych na drodze badawczej wartości parametrów wytrzymałościowych elementów składowych połączenia [27, 111, 137]. Przyjmowane dla przykładu w analizie wytrzymałościowej taśm przeniósniowych i ich złączy wartości poszczególnych parametrów są odmienne, a w przypadku wartości modułu Younga dla warstwy przekładki tkaninowej różnią się często aż o 100%. Można, zatem stwierdzić, że mimo dużej w tym zakresie liczby publikacji w ostatnich latach, właściwe, poprawne i wiarygodne określenie właściwości mechanicznych szczególnie materiałów pochodzenia kauczukowego nadal jest zagadnieniem dość trudnym, w wielu przypadkach nierozwiązanym [50, 53]. Dlatego też rozwiązanie problemu prawidłowej identyfikacji właściwości wytrzymałościowych tego typu materiałów w aspekcie budowy poprawnego modelu numerycznego połączenia klejowego jest istotnym zagadnieniem z punktu widzenia przemysłowego zastosowania tej metody łączenia materiałów gumowych. Szczególnie istotnym jest to zagadnienie z racji konieczności posiadania wiedzy w zakresie rozwiązywania problemów odpowiedniego użycia właściwego kleju i parametrów połączenia w celu uzyskania optymalnych właściwości i cech eksploatacyjnych złącza.

Poprawne określenie cech materiałów zastosowanych w połączeniu wymaga zatem przeprowadzenia przygotowawczych badań laboratoryjnych według specjalnie opracowanego planu pomiarów i z zastosowaniem odpowiedniego stanowiska pomiarowego. Założenie takie wynika z faktu, że typowym błędem w przygotowaniu modeli materiałowych dla gumy jest przeprowadzanie prób wytrzymałościowych dla określenia naprężeń i odkształceń w odniesieniu do początkowej wartości przekroju poprzecznego próbki. Duże, z reguły nieanalizowane przewężenie próbki w czasie badań wytrzymałościowych

w istotny sposób wpływa na niedokładność modelu MES analizowanej konstrukcji.

Istotnym problemem w trakcie analiz z wykorzystaniem MES jest również odpowiednie zdefiniowanie modeli analizowanych materiałów. W przypadku gumy oraz bazującego na gumie kleju kauczukowego z reguły w literaturze przyjmowany jest w tym przypadku do analizy model materiału hipersprężystego w oparciu o prawo Mooney-Rivlina [17, 27, 114]. Odbywa się to jednak wyłącznie na zasadzie dość arbitralnego wyboru, bez weryfikacji przy pomocy rzeczywistych danych pochodzących z badań wytrzymałościowych. Tymczasem guma to materiał zdolny do bardzo dużych odkształceń i z tej racji zaliczany do kategorii materiałów hipersprężystych, wymagających odpowiednich modeli konstytutywnych oraz wiarygodnego ich doboru w konkretnym przypadku. Hipersprężystość jest, bowiem definiowana [183], jako zdolność materiału do ulegania dużemu odkształceniu sprężystemu pod wpływem małych sił, bez utraty pierwotnych właściwości. Materiał hipersprężysty wykazuje zachowanie nieliniowe, co oznacza, że jego deformacja nie jest wprost proporcjonalna do przyłożonego obciążenia. Liniowe modele sprężystości zupełnie nieadekwatne w tym przypadku zakładają liniową zależność odkształcenie-napężenie oraz małe wartości odkształceń. Guma natomiast, jako materiał o dużym odkształceniu sprężystym analizowana jest jako odrębna grupa materiałowa. Dlatego też problematyce materiałów gumowych, ich modeli oraz modelowania ich zachowania się w różnych konstrukcjach i warunkach, poświęcono w ostatnim dziesięcioleciu wiele publikacji [3, 25, 38, 50, 56, 62, 114, 120, 183]. Jak zauważa jednak Diani i inni [50] – pomimo znaczącej liczby publikacji w renomowanych światowych wydawnictwach naukowych, odpowiednio dokładne zamodelowanie zachowania się materiałów gumowych nadal pozostaje kwestią otwartą. Dysponujemy wprawdzie szeregiem modeli matematycznych opisujących zachowanie się takich materiałów [131, 189], które powstawały począwszy od roku 1940, kiedy to Mooney przedstawił swoją teorię dużych odkształceń sprężystych. Rivlin i Sanders w 1951 roku badali duże deformacje sprężyste gumy, Błatz i Ko (1993) przedstawili nową postać funkcji energii odkształcenia dla deformacji materiałów gumowych, a Yeoh (1993) zaproponował funkcję energii odkształcenia opisującą wypełnione sadzą wulkanizaty gumowe. I tak aż do końca XX wieku, kiedy to Ogden sformułował funkcję energii odkształcenia do opisu gumopodobnych ciał stałych nieliniowych zdolnych do dużych odkształceń sprężystych, a opartą na funkcji gęstości energii odkształcenia. Inne związki konstytutywne opierają się z kolei na makromolekularnej strukturze sieciowej [183], a dla każdego z nich niezbędne jest wyznaczenie zespołu współczynników. Na modelowanie i projektowanie materiałów hipersprężystych składają się zatem takie czynności, jak dobór odpowiedniej funkcji energii odkształcenia oraz prawidłowe wyznaczenie stałych materiałowych dla takiej funkcji. W przypadku modelowania materiałów hipersprężystych w dostępnych publikacjach ich dobór

w konkretnym przypadku odbywa się z reguły na zasadzie arbitralnej decyzji. Jest to często pierwszym, podstawowym błędem, skutkującym niedokładnością wyników modelowania. Jeśli dysponuje się danymi pochodzącymi z badań wytrzymałościowych, na drodze eksperymentalnej możliwe jest sprawdzenie, który z dostępnych modeli teoretycznych najlepiej odwzorowuje zachowanie się modelowanego materiału. W tym też celu oddzielnie dla każdego z materiałów składowych pochodzenia kauczukowego analizowanego złącza klejowego należy przetestować dostępne modele opracowane dla materiałów hipersprężystych [2, 3, 38, 50, 131, 172, 183, 189]. Wynik analizy pozwoli na ocenę ich stopnia zgodności z danymi eksperymentalnymi za pomocą analizy zachowania się materiału hipersprężystego w oparciu o tworzone krzywe reakcji przy wykorzystaniu wybranych potencjałów energii odkształcenia dla posiadanych danych testowych [137]. Taki sposób postępowania wynika z analizowanego wcześniej faktu, że materiały hipersprężyste opisuje się w kategorii potencjału energii odkształcenia $U(\varepsilon)$ [189], który określa energię odkształcenia zmagazynowaną w materiale na jednostkę objętości odniesienia (objętość w układzie początkowym). Jak wspomniano wcześniej - dysponujemy szeregiem postaci równań opisujących tę wielkość, co umożliwi skuteczne modelowanie analizowanej klasy materiałów przy pomocy równania Arruda-Boyce, równania Marlowa, Mooney-Rivlina, równania tzw. Neo-Hookean, równania Ogdena, równania wielomianowego, skróconego równania wielomianowego, równania Yeoh oraz równania Van der Waalsa [42, 50, 131, 183, 189]:

- **Model Arruda-Boyce**, zgodnie z którym potencjał energii odkształcenia określony jest zależnością:

$$U = \mu \left\{ \frac{1}{2}(\bar{I}_1 - 3) + \frac{1}{20\lambda_m^2}(\bar{I}_1^2 - 9) + \frac{11}{1050\lambda_m^4}(\bar{I}_1^3 - 27) + \frac{19}{7000\lambda_m^6}(\bar{I}_1^4 - 81) + \frac{519}{673750\lambda_m^8}(\bar{I}_1^5 - 243) \right\} + \frac{1}{D} \left(\frac{J_{el}^2 - 1}{2} - \ln J_{el} \right), \quad (2.2)$$

gdzie U oznacza ilość energii odkształcenia na jednostkę objętości odniesienia, μ , λ_m oraz D – to zależne od temperatury parametry materiałowe, \bar{I}_1 - oznacza pierwszy niezmiennik dewiatora odkształcenia zdefiniowany wzorem $\bar{I}_1 = \bar{\lambda}_1^2 + \bar{\lambda}_2^2 + \bar{\lambda}_3^2$, w którym $\bar{\lambda}_1$ - to wartość dewiatorowa rozciągnięcia opisana zależnością $\bar{\lambda}_i = J^{-\frac{1}{3}}\lambda_i$, J – współczynnik objętości całkowitej, J_{el} - to współczynniki objętości sprężystej, λ_i - oznacza wartości

główne rozciągnięcia. Związek pomiędzy początkowym modułem odkształcenia postaciowego μ_0 a μ określa zależność:

$$\mu_0 = \mu \left(1 + \frac{3}{5\lambda_m^2} + \frac{99}{175\lambda_m^4} + \frac{513}{875\lambda_m^6} + \frac{42039}{67375\lambda_m^8} \right) \quad (2.3)$$

Konstrytuwny model zachowania się gumowych materiałów sprężystych przy dużych wydłużeniach zaproponowany przez Arrudę i Boyce'a w roku 1993 nazywany jest również często modelem ośmiołańcuchowym, ponieważ został wyprowadzony przez idealizację polimeru do postaci ośmiu sprężystych łańcuchów wewnątrz elementu objętościowego. Zależność naprężenia od odkształcenia oparta została na ośmiołańcuchowej reprezentacji makromolekularnej struktury gumy.

- **Model Marlowa**, w którym potencjał energii odkształcenia Marlowa ma następującą postać:

$$U = U_{dev}(\bar{I}_1) + U_{vol}(J_{el}), \quad (2.4)$$

gdzie U wyraża energię odkształcenia na jednostkę ciała w konfiguracji odniesienia, U_{dev} – stanowi jej część postaciową, a odpowiednio U_{vol} – jej część objętościową. Część postaciową potencjału określa się podając dane z testów jednoosiowych, dwuosiowych lub płaskich. Natomiast część objętościową określa się podając dane objętościowe, określając współczynnik Poissona lub też odkształcenia boczne wraz z danymi pochodzącymi z testów wykorzystywanych przy określaniu części postaciowej potencjału energii odkształcenia.

- **Model Mooney-Rivlina**, w którym potencjał energii odkształcenia określa zależność:

$$U = C_{10}(\bar{I}_1 - 3) + C_{01}(\bar{I}_2 - 3) + \frac{1}{D_1}(J_{el} - 1)^2, \quad (2.5)$$

gdzie: C_{10} , C_{01} i D_1 to zależne od temperatury parametry materiałowe, \bar{I}_2 - to drugi niezmiennik dewiatora odkształcenia zdefiniowany, jako $\bar{I}_2 = \bar{\lambda}_1^{(-2)} + \bar{\lambda}_2^{(-2)} + \bar{\lambda}_3^{(-2)}$.

- **Model Neo-Hookean**, określający potencjał energii odkształcenia przy pomocy zależności:

$$U = C_{10}(\bar{I}_1 - 3) + \frac{1}{D_1}(J_{el} - 1)^2 \quad (2.6)$$

- **Model Ogdena**, w którym potencjał energii odkształcenia określony przez Ogdena dla materiałów hipersprężystych i przypadku znacznych wartości odkształceń nieściśliwych gumopodobnych ciał stałych ma postać:

$$U = \sum_{i=1}^N \frac{2\mu_i}{\alpha_i^2} (\bar{\lambda}_1^{\alpha_i} + \bar{\lambda}_2^{\alpha_i} + \bar{\lambda}_3^{\alpha_i} - 3) + \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_1} (J_{el} - 1)^{2i}, \quad (2.7)$$

gdzie N jest parametrem materiałowym, a μ_i, α_i, D_1 - oznaczają zależne od temperatury parametry materiałowe, które można wyznaczyć w testach badawczych.

- **Równanie wielomianowe** – w którym potencjał energii odkształcenia można zapisać w postaci wielomianu:

$$U = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N C_{ij} (\bar{I}_1 - 3)^i (\bar{I}_2 - 3)^j + \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i} (J_{el} - 1)^{2i}, \quad (2.8)$$

gdzie C_{ij} – oznacza zależny od temperatury parametr materiałowy.

- **Skrócone równanie wielomianowe** na potencjał energii odkształcenia mające postać:

$$U = \sum_{i=1}^N C_{i0} (\bar{I}_1 - 3)^i + \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_1} (J_{el} - 1)^{2i}, \quad (2.9)$$

gdzie C_{i0} to parametr materiałowy zależny od temperatury.

- **Model Van der Waalsa**, opisujący potencjał energii odkształcenia za pomocą zależności:

$$U = \mu \left\{ -(\lambda_m^2 - 3) [\ln(1 - \eta) + \eta] - \frac{2}{3} a \left(\frac{\tilde{I} - 3}{2} \right)^{\frac{3}{2}} \right\} + \frac{1}{D} \left(\frac{J_{el}^2 - 1}{2} - \ln J_{el} \right), \quad (2.10)$$

$$\tilde{I} = (1 - \beta) \bar{I}_1 + \beta \bar{I}_2, \quad (2.11)$$

$$\eta = \sqrt{\frac{\tilde{I} - 3}{\lambda_m^2 - 3}}, \quad (2.12)$$

gdzie μ oznacza początkowy moduł odkształcenia postaciowego, a – oznacza parametr interakcji, β to stała materiałowa, oraz D to ściśliwość.

- **Model Yeoh**, określający potencjał energii odkształcenia przy pomocy funkcji:

$$U = C_{10}(\bar{I}_1 - 3) + C_{20}(\bar{I}_1 - 3)^2 + C_{30}(\bar{I}_1 - 3)^3 + \frac{1}{D_1}(J_{el} - 1)^2 + \frac{1}{D_2}(J_{el} - 1)^4 + \frac{1}{D_3}(J_{el} - 1)^6, \quad (2.13)$$

gdzie C_{i0} oraz D_i to parametry materiałowe zależne od temperatury.

Przedstawione modele w wielu przypadkach są ze sobą powiązane. Dla przykładu - skrócony model wielomianowy oraz model Mooney-Rivlina mogą być traktowane, jako szczególne przypadki modelu wielomianowego. Potencjały energii odkształcenia obliczone z zastosowaniem modelu Yeoha oraz Neo-Hookean mogą być postrzegane, jako specjalne przypadki skróconego równania wielomianowego. Z kolei szczególne modele materiałowe postaci Mooney-Rivlina i Neo-Hookean można również wyprowadzić z ogólnej postaci potencjału energii odkształcenia Ogdena dla określonych wartości μ_i oraz α_i [189]. Jak podaje literatura [2, 42, 50, 131, 189], na ogół przy dostępie do danych z wielu laboratoryjnych testów wytrzymałościowych (zazwyczaj co najmniej jednoosiowych), równania postaci modelu Ogdena oraz Van der Waalsa precyzyjnie odpowiadają wynikom badań. Gdy dostępne dane testowe są ograniczone, wtedy równania modeli Arrudy-Boyce'a, Van der Waalsa oraz Yeoh, czy też skrócona postać równania wielomianowego, w dostatecznie wierny i zadowalający sposób odzwierciedlają zachowanie materiału. Gdy dostępny jest tylko jeden zestaw danych testowych zalecane jest stosowanie modelu z równaniem Marlowa, ponieważ w tym przypadku określony zostanie potencjał energii odkształcenia, który dokładnie odtwarza dane testowe i który są ograniczone, wtedy równania modeli Arrudy-Boyce'a, Van der Waalsa oraz Yeoh, czy też skrócona postać równania wielomianowego, w dostatecznie

wierny i zadowalający sposób odzwierciedlają zachowanie materiału. Gdy dostępny jest tylko jeden zestaw danych testowych zalecane jest stosowanie modelu z równaniem Marlowa, ponieważ w tym przypadku określony zostanie potencjał energii odkształcenia, który dokładnie odtwarza dane testowe i który ponadto wykazuje zadowalające zachowanie modelowanego materiału w innych typach deformacji.

Kompleksowa analiza w tym zakresie wymaga zatem odpowiednio przeprowadzonych badań laboratoryjnych w celu identyfikacji cech modelowanych materiałów oraz numerycznej weryfikacji odwzorowania każdego z nich przez dostępne modele. Badania laboratoryjne i modelowanie numeryczne to jedna z metod poszukiwania sposobów zwiększenia trwałości połączeń taśmy przerośnikowej. Drugi obszar poszukiwań to zastosowanie odpowiednich metod diagnostycznych zapewniających niezawodność systemu transportu przerośnikowego.

2.3. Metody diagnostyczne w przerośnikowych układach transportowych

Stosowane obecnie systemy transportowe opierające się na przerośnikach taśmowych są często pod względem technologicznym i konstrukcyjnym rozwiązaniami dość skomplikowanymi, nowoczesnymi, a zarazem i kosztownymi, od których w większości przypadków zależy nie tylko wydajność całego systemu transportu, ale również efektywność i skuteczność działania innych, współpracujących z nimi układów systemu produkcyjnego przedsiębiorstwa. Transport taśmowy i współpracujące z nim podsystemy w wielu przypadkach mają, bowiem strukturę szeregową. A w takim przypadku awaria jednego z podstawowych elementów systemu, jakim jest przerośnik taśmowy wymusza postój wszystkich innych maszyn i urządzeń. Dlatego też niezwykle istotnym zagadnieniem staje się problem zapewnienia odpowiedniego poziomu gotowości systemu transportu ciągłego. W przypadku przerośników taśmowych zależny jest on nie tylko od ich walorów użytkowych, determinowanych zastosowanymi rozwiązaniami konstrukcyjnymi i wykonawstwem. W istotnym stopniu zależy również od właściwego poziomu ich użytkowania, rozumianego między innymi, jako stopień zaawansowania i skuteczności zastosowanych metod i narzędzi diagnostyki przemysłowej.

Taśma przerośnikowa, jak każdy element konstrukcyjny podlega zużyciu, czyli procesowi stopniowego niszczenia pod wpływem czynników fizykochemicznych, zmiennego obciążenia i czasu pracy w całym okresie eksploatacji [206]. Jednym z rodzajów zużycia adhezyjnego jest również analizowane

w pracy zerwanie taśmy w obszarze złącza. Przyczyny powstawania tego typu uszkodzenia mogą mieć zarówno charakter konstrukcyjny (błędy projektowe), wykonawczy (niestaranność wykonania połączenia) oraz starzeniowy. Uszkodzenia o podłożu starzeniowym towarzyszą eksploatacji każdego obiektu technicznego. Są one rezultatem nieodwracalnych zmian prowadzących do pogorszenia wytrzymałości, co jest szczególnie ważne w odniesieniu do połączeń taśm przenośnikowych. Wykorzystanie metod diagnostyki technicznej w eksploatacji przenośników taśmowych staje się istotnym zagadnieniem dotyczącym również racjonalnego ich użytkowania. Jednak nadal tylko w niewielkim stopniu metody diagnostyki technicznej są wykorzystywane w przypadku przenośników taśmowych i bazujących na nich systemów transportu. Szczególnie jest to istotne w przypadku, gdy nowoczesne środki przekazywania informacji pozwalają na skuteczne monitorowanie stanu maszyn i urządzeń, a inne metody i techniki komputerowe umożliwiają przetworzenie zgromadzonych danych z wykorzystaniem metod wnioskowania, prognozowania itp. Dlatego też tej grupie zagadnień w odniesieniu do przenośnikowych systemów transportowych poświęcona jest dalsza część niniejszej pracy.

2.3.1. Diagnostyka i monitorowanie przenośnikowych systemów transportowych

Jak podaje definicja [204] – diagnostyka techniczna zajmuje się oceną stanu technicznego maszyny między innymi poprzez badanie procesów roboczych i towarzyszących pracy maszyny. Istota diagnostyki polega zatem na określeniu stanu obiektu w sposób pośredni, w oparciu o pomiar generowanych sygnałów. A zatem, aby określić stan procesu lub systemu należy dokonać pomiaru wartości wielkości fizycznych, wybranych dla opisu tego stanu. Typowe monitorowanie stanu maszyny, to z kolei wg definicji [105] przeprowadzanie w czasie rzeczywistym zadania polegającego na zbieraniu i przetwarzaniu zmiennych procesowych oraz rozpoznawaniu nieprawidłowych zachowań (sygnalizacja alarmów). Systemy monitorowania są zatem diagnostycznymi systemami czasu rzeczywistego, które oprócz bieżącej diagnostyki mogą również być wykorzystane do wspomaganie obsługi w zakresie zabezpieczenia obiektu [105].

W przypadku pojedynczego przenośnika taśmowego, czy też całego systemu transportu przenośnikowego monitorowane są przeważnie takie wielkości lub cechy, jak [20, 122]: prędkość przesuwu taśmy, zbieganie taśmy, jej zużywanie się, analizowana jest temperatura elementów współpracujących z taśmą, wykrywane są elementy metalowe w transportowanym materiale,

mierzona jest prędkość obrotowa bębna oraz wydajność przerośnika. Monitorowanie przerośników taśmowych w ogólnym ujęciu dotyczy, symptomów diagnostycznych, parametrów technologicznych i parametrów pracy oraz parametrów bezpieczeństwa [7].

Określanie stanu bieżącego przerośnika taśmowego, analiza historii jego pracy, obciążenia transportowanym materiałem itp. w kontekście racjonalnego gospodarowania tym środkiem transportu, a szczególnie taśmami odbywa się z wykorzystaniem różnych metod, narzędzi i systemów. Najprostsza metoda stosowana w gospodarce taśmami to strategia wymian prewencyjnych, która polega na wymianie taśmy w odpowiednim momencie, zapewniając optymalny stopień bezpieczeństwa ciągłości pracy całego systemu [109]. Znacznie bardziej skuteczne i efektywne jest stosowanie w tym celu diagnostyki elementów przerośnika taśmowego. Najprostsza metoda diagnostyczna to stosowane na każdej zmianie wizualne oględziny stanu taśmy oraz stanu jej połączeń [97]. Jest to jednak metoda czasochłonna i mało efektywna, wymagająca dodatkowo zatrudnienia do tego celu wysoko wykwalifikowanego personelu. Wskazano zatem skuteczne zastąpienie tych prostych metod poprzez odpowiednie wykorzystanie nowoczesnych środków technicznych. Dlatego też w systemach transportu przerośnikowego parametry charakteryzujące pracę systemu, urządzenia lub samej taśmy są z reguły monitorowane również w sposób ciągły z zastosowaniem pomiarowych systemów mobilnych lub stacjonarnych. Te ostatnie mogą służyć gromadzeniu danych i ich analizie oraz wizualizacji w wersji off-line lub on-line. W niektórych przypadkach nadal wykorzystuje się również wyniki oceny właściwości taśm przerośnikowych (identyfikacja wytrzymałości taśmy na rozciąganie na podstawie badań rentgenograficznych struktury włókna, ocena wydłużenia względnego taśmy przy obciążeniu jej siłą równą 10% nominalnej siły zrywającej itp.) [122]. Metody te jednak nie nadają się do zastosowania w systemach monitorowania ciągłego.

Identyfikacja parametrów pracy przerośników taśmowych może być również skutecznie realizowana z zastosowaniem mobilnych systemów pomiarowych. Rezultaty prowadzonych tą metodą pomiarów mogą wykazywać poprawność pracy przerośników, ale także wskazywać na błędy popełnione w założeniach projektowych, obliczeniach i doborze podzespołów przerośnika skutkujących zmniejszeniem trwałości jego elementów i niezawodności całej konstrukcji [110]. Inna grupa stosowanych metod diagnostycznych to wykorzystanie technik komputerowych do kontroli wybranego, pojedynczego parametru lub elementu, którego stan ma istotny wpływ na niezawodność całego urządzenia i systemu transportu taśmowego. Przykładem jest tutaj ocena stanu rdzenia taśmy przerośnikowej z linkami stalowymi [162], za pomocą aparatury pomiarowej, której działanie wykorzystuje metodę magnetyczną monitorowania uszkodzeń. System ten służy do monitorowania stanu rdzenia taśmy bezpośrednio na przerośniku, a jego praca polega na pomiarze i rejestracji zmian pola

magnetycznego, powstających w miejscach nieciągłości, jakimi są miejsca uszkodzeń linek stalowych rdzenia taśmy. W podobny sposób działa system eksploatacyjnego monitorowania i lokalizacji uszkodzeń zbrojonej taśmy przenośnikowej [112], polegający na wytwarzaniu stałego pola magnetycznego w obwodzie zamykającym się przez uzbrojenie na odcinku pomiarowym wzdłuż taśmy oraz w płaszczyźnie prostopadłej do jej powierzchni, pomiarze natężenia pola magnetycznego, przetworzeniu sygnału pomiarowego i analizie uszkodzeń. Stosowane są również metody radiograficznego diagnozowania taśm tkaninowych i z linkami stalowymi (poszukiwanie pęknięć i obszarów skorodowanych) oraz ultradźwiękowego diagnozowania w celu wykrycia rozcięć w taśmie [122].

Jedynym z niewielu istniejących dotychczas sposobów przeciwdziałania części z przyczyn awarii taśmy jest zainstalowanie w niej specjalnych czujników sygnalizujących uszkodzenie lub zużycie taśmy, opartych na działaniu transponderów – urządzeń elektronicznych stosowanych w systemach radaru czynnego. Transponder odbiera sygnały radiowe z jednego układu (nadawczego), gromadzi je, przetwarza i wzmacnia oraz przekazuje je do innego układu odbiorczego [8, 84, 148]. Transpondery zaimplantowane w taśmie pozwalają jednak jedynie na ocenę zużycia ściernego taśmy lub jej rozcięcia. Nie jest to również rozwiązanie doskonałe, ponieważ wymaga budowy specjalnego systemu nadawczo-odbiorczego, układu anten oraz odpowiednio zaimplantowanych transponderów. Jakość danych uzyskiwanych z takiego systemu jest niska, a duża liczba wrażliwych na uszkodzenia urządzeń wchodzących w jego skład stanowi znaczące utrudnienie dla obsługi. Są to ponadto systemy lokalne, znajdujące rzadkie zastosowanie w układzie rozbudowanego i kompleksowego monitorowania, a z racji dość skomplikowanej konstrukcji i niskiej efektywności są wykorzystywane w praktyce przemysłowej niezwykle rzadko. W podobny sposób działa również system Sensor Guard firmy Goodyear [8, 122]. Służy on jednak jedynie do ochrony taśmy przed rozległymi uszkodzeniami w przypadku jej przecięcia, sygnalizuje ruchy poprzeczne i nadmierny poślizg taśmy.

W nowoczesnych systemach transportowych powszechną tendencją staje się instalowanie pełnego monitorowania opierającego się na technice komputerowej. Jednym z takich systemów jest program ZEFIR NT obsługujący system transportu materiału skalnego [109]. Jednak jego skuteczność jako systemu monitorującego jest dość ograniczona, ponieważ zadaniem systemu jest jedynie gromadzenie, analizowanie i wizualizacja danych dotyczących czasu pracy poszczególnych urządzeń, liczby połączeń, czasu przerw w ruchu itp. System ten nie pełni zatem żadnej funkcji diagnostycznej, a rejestrowane przez niego dane mogą być analizowane głównie ze znacznym opóźnieniem.

Dążenie do zapewnienia kompleksowego monitorowania uszkodzeń taśm przenośnikowych było również celem badań, których wyniki prezentuje praca [193]. Opisuje ona projektowany system, który ma służyć wykrywaniu

uszkodzeń taśmy na wczesnym etapie, przyczyniając się do szybkiego reagowania i zapobiegania rozprzestrzenianiu się uszkodzeń i ich skutków. Zgodnie z koncepcją tego systemu monitorowania taśm przerośnikowych, taśma została umownie podzielona na sektory powtarzalne, w których będą występować takie same detektory parametrów charakterystycznych dla typowych uszkodzeń. Powtarzalne sektory w taśmie to zaimplantowane elementy detekcyjne (obwody kontrolne) oraz transpondery znacznikowe, analogiczne, jak w opisanych wyżej systemach firmy Goodyear. W podobnych odstępach rozmieszczane są grupy czujników i układy elektroniczne zastosowane do monitorowania uszkodzeń taśmy. Długość taśmy zabezpieczonej zaimplantowanym w niej jednym obwodem kontrolnym wynosi od 3 do 5 metrów. Grupy czujników podłączone do kontrolerów realizujących ich zasilanie i odbiór sygnałów rozmieszczone są w odstępach odpowiednich do długości zabezpieczonego odcinka taśmy [193]. Istotną wadą tego systemu jest jego dość skomplikowana struktura oraz fakt zastosowania transponderów spełniających rolę znaczników obwodów kontrolnych. Transpondery i obwody kontrolne muszą być bowiem implantowane w taśmie przerośnikowej na etapie jej produkcji, co wymusza konieczność modyfikacji procesu technologicznego oraz późniejszego uzyskania specjalnego dopuszczenia taśmy do eksploatacji. Fakt ten powoduje wzrost kosztu produkcji taśmy, a opracowana metoda monitorowania nie może być uznana za uniwersalną, możliwą do zastosowania w każdym, również w już pracującym przerośniku, ponieważ wymaga specjalnego typu taśmy.

Opisane powyżej przykładowe systemy oraz inne im podobne kontrolują niektóre parametry związane z awaryjnością przerośników taśmowych, jednak nie zabezpieczają przed nagłym zerwaniem taśmy w obszarze złącza oraz nie tworzą systemu kompleksowego monitorowania i sterowania.

2.3.2. Potrzeby rozwoju systemów diagnostycznych w przerośnikowych układach transportowych

Taśmy przerośnikowe w większości przypadków eksploatowane są w agresywnych warunkach, w systemach transportowych, które podlegają ciągłym zmianom. Wszystkie te czynniki w niekorzystny sposób wpływają na żywotność taśmy, powodują konieczność wykonywania nowych połączeń lub też łączenia fragmentów taśmy pracujących w różnych warunkach, przy często odmiennym obciążeniu transportowanym materiałem. W takiej sytuacji, kiedy na żywotność taśmy, czy trwałość jej złącza wpływa tak wiele czynników, o których nie mamy dostatecznej wiedzy, zapewnienie racjonalnej gospodarki taśmami jedynie w oparciu o strategię wymian prewencyjnych

oraz wizualne metody kontroli stanu taśmy na przenośnikach jest wysoce nieskuteczne. Mimo szeregu typów uszkodzeń, na jakie narażona jest taśma przenośnikowa oraz jej połączenia, aktualnie nie istnieją stosownie zaawansowane i uniwersalne systemy diagnostyczne dla przenośników taśmowych. Powszechnie stosowane są jedynie proste systemy dyspozytorskie bazujące na czujnikach ruchu, temperatury, spiętrzenia transportowanego materiału, czy też poślizgu. Ich zadaniem jest przekazywanie informacji o pracy urządzenia z wizualizacją dwóch jego stanów – „praca” lub „postój”, bez jakichkolwiek możliwości diagnozowania przyczyn awarii, przeciwdziałania ich wystąpieniom lub sterowania pracą. Skuteczna i efektywna diagnostyka taśm przenośnikowych jest zatem niezbędna dla stałej oceny stanu taśmy w aspekcie zapobiegania poważnym awariom, co w konsekwencji przynosi konkretne korzyści wynikające z przedłużenia czasu jej eksploatacji.

W istniejących systemach diagnostycznych analiza zbieranych danych oraz porównywanie ich z danymi zarejestrowanymi w przeszłości pozwala na odpowiednie podejmowanie decyzji odnośnie napraw, konserwacji lub wymiany taśmy, czy też złącza. Jak zauważa jednak Lutyński [122], systemy takie są dość nieefektywne i kosztowne z racji konieczności zatrudniania do ich obsługi wyspecjalizowanego personelu potrafiącego system obsługiwać i interpretować uzyskiwane dane. Stosowane jest w tym przypadku wprawdzie wykonywanie okresowych przeglądów i przeprowadzanie analizy zgromadzonych danych przez ekspertów zewnętrznych, jednak i ten sposób postępowania posiada szereg bezdyskusyjnych wad. Rozwiązaniem w tym przypadku może być wykorzystanie możliwości automatyzacji kontroli i diagnozowania ciągłego, wspieranych narzędziami i technikami inteligentnymi, mającymi zdolność prognozowania oraz wspomagania procesu podejmowania decyzji.

Opracowanie odpowiedniego, w pełni zautomatyzowanego systemu diagnozowania elementów transportu taśmowego staje się zatem koniecznością, szczególnie z racji nadal wysokich kosztów wynikających ze strat, jakie są ponoszone w efekcie uszkodzenia taśmy lub złącza. Wykorzystywanie uproszczonych analiz jest w tym przypadku czasochłonne i nieefektywne. Wysoce niekorzystne jest przy tym osiągnięcie dość często stanu zmniejszonej dyspozycyjności systemu transportu, wydłużenie czasu wykonywania czynności naprawczych i serwisowych oraz wzrost kosztów eksploatacji. Szczególnego znaczenia problem ten nabiera w przypadku zerwania taśmy przenośnikowej w obszarze złącza.

Analiza danych generowanych przez system oceny stanu taśmy przenośnikowej prowadzona przez operatora związana jest z kilkoma istotnymi problemami – znaczną ilością danych pojawiających się w każdej sekundzie pracy systemu, odnoszących się do często dużej i zmiennej liczby obiektów, dużą dynamiką zmian oraz koniecznością szybkiej analizy i walidacji sygnałów. Nie bez znaczenia jest również przypadkowość oraz występowanie zakłóceń, znaczna złożoność problemu, czy też możliwość występowania danych

i sygnałów obarczonych błędami. Koniecznością gwarantującą wysoką efektywność systemu diagnostycznego jest w tym przypadku w pierwszej kolejności zastosowanie systemu wspomagania decyzji, którego zadaniem byłoby zwiększenie efektywności podejmowanych decyzji, skrócenie czasu ich podejmowania oraz weryfikacja generowanych sygnałów w oparciu o odpowiednie reguły wnioskowania. Zadania takie mogą być wykonane przez odpowiedni system ekspertowy bazujący na prognozowaniu przyszłych wartości analizowanych szeregów czasowych, z jednoczesnym wykorzystaniem wartości prognostycznych oraz reguł wnioskowania do weryfikacji ewentualnych fałszywych sygnałów alarmowych. Przewidywanie przyszłych wartości np. zmiany długości złącza klejowego ma charakter klasyfikacji i szacowania odniesionego do przyszłych okresów czasowych. Wszystkie metody i techniki wykorzystywane do szacowania i klasyfikacji (metody szacowania wartości punktu i przedziału ufności, korelacja, regresja wielokrotna, metody eksploracji danych i odkrywania wiedzy) przy zachowaniu określonych warunków mogą być również wykorzystane do prognozowania [73, 98, 115], jednak skutecznym narzędziem w prognozowaniu szeregów czasowych są sztuczne sieci neuronowe [1, 30, 31, 39, 76, 77, 102, 106, 130, 132, 147, 164-166, 168, 169, 202, 210]. System monitorowania stanu taśm przENOŚnikowych wymaga zatem wzbogacenia o system ekspertowy bazujący na najpopularniejszej w tym przypadku reprezentacji wiedzy opartej na systemach reguł.

W szerokiej gamie zagadnień i problemów technologicznych rozwiązywanych z zastosowaniem metod i technik sztucznej inteligencji, znaczna część prowadzonych prac dotyczy w szczególności właśnie systemów doradczych, lub inaczej systemów eksperckich (ekspertowych) [4, 12, 13, 34, 59, 104, 145, 146, 177, 185, 201]. System doradczy (ekspertowy) przeznaczony jest do wspomagania takich działań, jak obserwacja diagnostyczna badanego obiektu (w przypadku rozbudowanych układów monitorowania). Integruje on zazwyczaj kilka podstawowych elementów systemu doradczego, spośród których do najważniejszych można zaliczyć układ wnioskujący, bazę wiedzy, bazę danych i układ objaśniający, a także sterowanie dialogiem, które określa się także nazwą interfejsu użytkownika [103, 105, 113, 186, 204, 206]. System ekspertowy jest przeznaczony do specjalistycznych zadań, wymagających profesjonalnej wiedzy i doświadczenia w jej stosowaniu. Odpowiadający mu program komputerowy reprezentuje w ściśle określonej dziedzinie stopień doświadczenia i umiejętność rozwiązywania problemów porównywalny z wiedzą i doświadczeniem eksperta. Szczególnie ważnym i trudnym problemem, który należy rozwiązać podczas budowy systemu doradczego, jest pozyskanie odpowiedniej wiedzy dla tego systemu, która to może pochodzić od ekspertów lub też z baz danych.

W przypadku problematyki z zakresu tematyki diagnostyki przemysłowej, dzięki opracowaniu i wdrożeniu systemów ekspertowych uzyskujemy w ten sposób rozbudowane o narzędzia doradcze układy monitorujące [47, 85, 105], których zadaniem jest gromadzenie, przetwarzanie i wizualizacja danych

pomiarowych oraz wspomaganie wnioskowania i podejmowania decyzji dotyczących stanu technicznego diagnozowanego obiektu. W przypadku systemu diagnostyki eksploatacyjnej taśm przenośnikowych, moduł doradczy powinien mieć za zadanie wspomaganie interpretacji gromadzonych danych pomiarowych, wspomaganie poprawnego diagnozowania stanu złączy oraz predykcję czasu ich bezawaryjnej pracy w przypadku rejestracji pierwszych symptomów świadczących o obniżonej wytrzymałości. Wszystkie te działania możliwe są do realizacji przy zastosowaniu prognozowania przyszłych wartości zmian długości złącza taśmy przenośnikowej w analizie szeregu czasowego. Przetwarzanie gromadzonych danych pomiarowych może być również skutecznie wykorzystane w systemie ekspertowym wspomagającym racjonalną gospodarkę taśmami.

Pojawiająca się niejednoznaczność interpretacji oraz określenia lingwistyczne typu „duże odchylenie” i „małe odchylenie” skłaniają do poszukiwania dalszego rozwiązania analizowanego problemu nie w obszarze wnioskowania bazującego na klasycznych algorytmach, lecz w dziedzinie logiki rozmytej. Połączenie logiki oraz zbiorów rozmytych pozwala na prowadzenie wnioskowania szczególnie w sytuacji posługiwania się danymi nieprecyzyjnymi, z jakimi często mamy do czynienia w przypadku taśm przenośnikowych. W rozmytych systemach ekspertowych, podobnie jak w systemach klasycznych występuje baza wiedzy (tu z regułami rozmytymi) oraz aparat wnioskowania. Sam przebieg procedury wnioskowania jest jednak odmienny, wynikający z faktu, że często dane, dla których ma być prowadzone wnioskowanie są liczbami stanowiącymi wyniki pomiarów, a reguły oparte są na wartościach lingwistycznych [113, 184]. Zbiory rozmyte opierają się na zmiennych lingwistycznych, wartościach lingwistycznych oraz liczbach rozmytych. Zmienna lingwistyczna to wielkość, którą określamy stosując oceny lingwistyczne (wartości lingwistyczne). Wartość lingwistyczna jest, zatem słowną oceną wielkości lingwistycznej. Zbiór rozmyty A zgodnie z definicją [173], to zbiór par w pewnej numerycznej przestrzeni rozważań:

$$A = \{(\mu_A^*(x), x)\} \quad (2.14)$$

gdzie: μ_A jest funkcją przynależności zbioru rozmytego A , która każdemu elementowi $x \in X$ przypisuje stopień jego przynależności $\mu_A^*(x)$ do zbioru rozmytego, przy czym $\mu_A(x) \in [0,1]$.

Funkcja przynależności przyporządkowuje każdemu elementowi x danej zmiennej pewną wartość z zakresu $[0,1]$, zwaną stopniem przynależności, która to informuje, w jakim stopniu element x należy do zbioru rozmytego A :

$$\mu_A(x): X \rightarrow [0,1] \quad (2.15)$$

W wielu przypadkach wartość stopnia przynależności do podzbioru rozmytego jest wartością subiektywną, zależną od kontekstu. Podobnie również kształt funkcji przynależności ma większe znaczenie niż konkretna wartość [203]. Dzięki takiej formule stosując logikę rozmytą potrafimy każdej wartości ściślej przyporządkować liczbę wskazującą stopień zgodności tej wartości z określeniem wyrażonym w języku naturalnym [33, 52, 54, 83, 116, 118, 182, 185, 192]. W przypadku gromadzenia danych z przemysłowych systemów pomiarowych, dzięki swoim cechom liczby rozmyte pozwalają na uogólnienia dużej ilości informacji rejestrowanych przez urządzenia pomiarowe. Są również niezwykle przydatne w złożonych systemach, w których działają niemierzalne lub trudne do określenia zakłócenia. Podobnie jest w przypadku braku możliwości precyzyjnego pomiaru pewnych sygnałów w systemie monitorującym. Istotną cechą logiki rozmytej i bazujących na niej modeli jest fakt, że w przeciwieństwie do chętnie stosowanych w szeregu aplikacjach sztucznych sieci neuronowych, nie są one typem „czarnej skrzynki”, w przypadku, której analiza właściwości modelowanego obiektu bazująca na analizie opisującej go sieci neuronowej jest poważnie utrudniona [199]. Dzięki swoim cechom teoria zbiorów rozmytych umożliwia nie tylko modelowanie złożonych systemów, ale również wspomaganie procesów podejmowania decyzji.

2.4. Podsumowanie przeglądu literatury

Przedstawiona analiza problematyki badawczej taśm przeniósniowych i ich połączeń pozwala stwierdzić, że prowadzone dotychczas w tym zakresie prace dotyczą głównie konstrukcji i technologii wykonania złącza i jego wpływu na wytrzymałość, obejmując w części prac również problem analizy naprężeń w obszarze połączenia. Inny obszar badań to wytrzymałość zmęczeniowa oraz analiza rozkładu pracy odcinków taśmy z pominięciem złącza, której celem jest jak najbardziej precyzyjne przewidywanie momentu wymiany taśmy lub wykonania stosownych czynności serwisowych. Wszystkie wspomniane prace wpisują się w niejako wymuszany potrzebami przemysłowymi trend dążenia do ograniczenia kosztów eksploatacji systemów transportowych opartych na przeniósniach taśmowych, w wyniku zwiększenia trwałości zarówno taśmy, jak i jej połączeń. W każdej z cytowanych wcześniej prac zauważalne są jednak pewne uproszczenia, ograniczenia oraz odbiegające od oczekiwań rezultaty, wynikające między innymi z niedostępności odpowiednich danych do analizy, czy też znacznej czasochłonności oraz kosztu ich pozyskania. Nie bez znaczenia jest tu również wpływ niezbędnych

uproszczeń modeli analitycznych przyjmowanych w rozważaniach, ograniczeń czasowych w pozyskaniu danych do ich weryfikacji oraz niedoskonałości stosowanych metod pośrednich, chociażby w analizie rozkładu naprężeń w obszarze połączenia klejowego. Niezbędne zatem jest nieco inne spojrzenie na tę problematykę, zwłaszcza w obszarze problematyki inżynierii wiedzy i inżynierii diagnostyki oraz podjęcie próby rozwiązania, chociaż części z istniejących w tym zakresie problemów, w tym szczególnie dotyczących:

- konieczności zapewnienia racjonalnej eksploatacji transportu taśmowego, rozumianej, jako zastosowanie skutecznych metod diagnostyki eksploatacyjnej taśm przenośnikowych oraz złączy, gwarantujących ich wysoką trwałość i niezawodność,
- potrzeby ograniczenia bariery, jaką połączenia taśm przenośnikowych stanowią dla pełnego wykorzystania stale rosnących wartości nominalnych wytrzymałości taśm przenośnikowych przy pomocy odpowiednio zaplanowanych badań laboratoryjnych, pomiarów *in situ* oraz modelowania i symulacji numerycznych rozkładu naprężeń w złączu oraz wpływu na nie konstrukcji połączenia i właściwości jego materiałów,
- konieczności utworzenia bazy wiedzy o analizowanym obiekcie wraz z opisem w postaci zbioru faktów i reguł w celu zbudowania systemu ekspertowego mającego za zadanie gromadzenie, przetwarzanie i wizualizację danych diagnostycznych oraz wsparcie wnioskowania i podejmowania decyzji w kontekście oceny stanu technicznego i wspomagania racjonalnej gospodarki taśmami.

W sytuacji, gdy nadal pozostają nierozwiązanymi liczne problemy trwałości i wytrzymałości połączeń taśmy, konieczne jest doskonalenie metod obliczeniowych i diagnostycznych oraz wykorzystywanie doświadczeń z modelowania materiałów i konstrukcji wykonywanych metodami numerycznymi. Prace takie powinny być związane z dążeniem do oceny i analizy zjawisk zachodzących w obszarze połączeń taśm przenośnikowych, których poznanie i zrozumienie pozwoli między innymi na optymalizację konstrukcji połączenia w celu zwiększenia jego wytrzymałości oraz trwałości. Wiedza gromadzona w trakcie badań laboratoryjnych i symulacji numerycznych pomocna będzie z kolei w skonstruowaniu skutecznego układu diagnostycznego. Może też być wykorzystana przy opracowaniu reguł niezbędnych do budowy systemu ekspertowego wspomagającego wnioskowanie diagnostyczne.

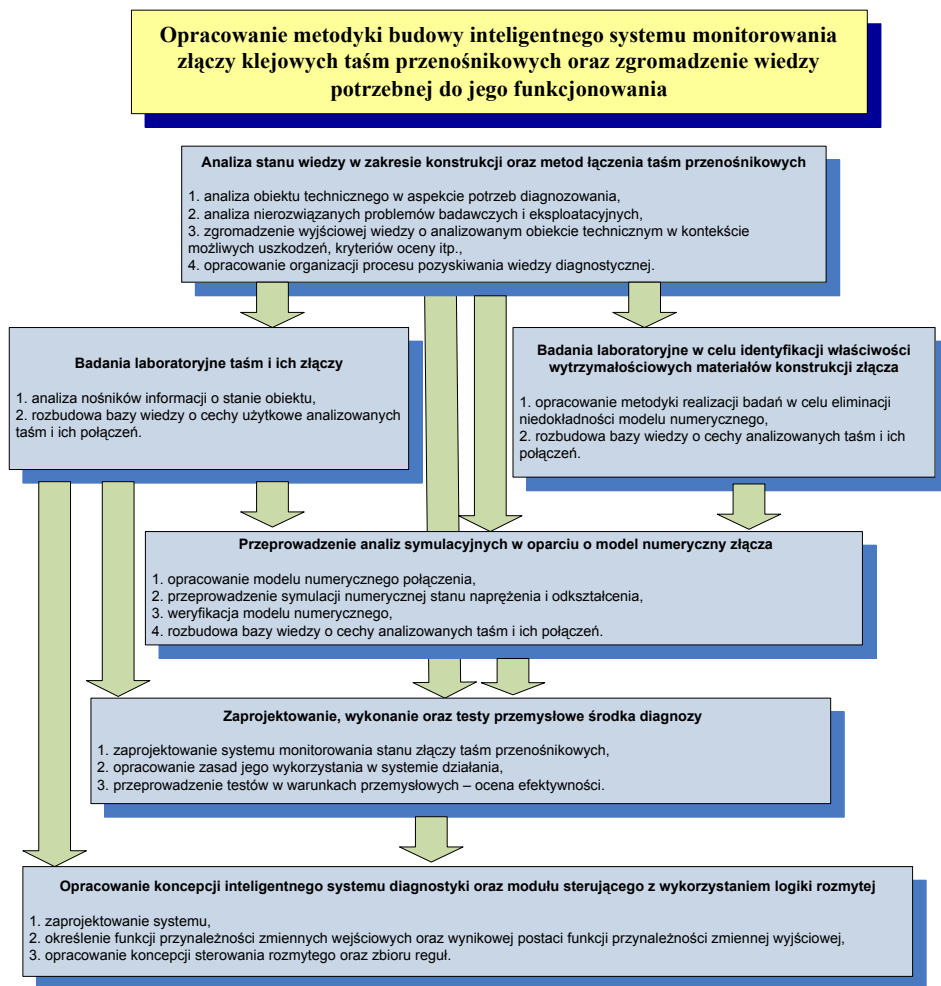
3. Problematyka badawcza i zakres pracy

Wyniki przeprowadzonej analizy stanu wiedzy z zakresu problematyki eksploatacji systemów transportu przerośnikowego wskazują na konieczność prowadzenia prac mających na celu zwiększenie trwałości oraz niezawodności połączeń taśm przerośnikowych. Przyjęcie tego elementu konstrukcji przerośnika taśmowego za obiekt badań przy założeniu zastosowania narzędzi inżynierii diagnostyki, wymaga między innymi przeprowadzenia obserwacji diagnostycznej obiektu. Związane jest to z koniecznością gromadzenia i przetwarzania danych niezbędnych do wnioskowania diagnostycznego oraz przeprowadzenia eksperymentów numerycznych wspierających wnioskowanie. Dlatego też głównym celem przeprowadzonych badań było opracowanie metodyki budowy inteligentnego systemu monitorowania złączy klejowych taśm przerośnikowych oraz zgromadzenie wiedzy potrzebnej do jego funkcjonowania.

Osiągnięcie założonego celu wymagało zaplanowania oraz systematycznego przeprowadzenia wieloetapowych i wielowątkowych prac stanowiących realizację szeregu powiązanych ze sobą cząstkowych zadań badawczych (rys. 3.1):

1. W pierwszej kolejności niezbędne było przeprowadzenie analizy obiektu technicznego, jakim jest taśma przerośnikowa i jej połączenia w ujęciu oceny potrzeb diagnozowania, czemu służy przegląd problematyki eksploatacyjnej i badawczej w tym właśnie zakresie. Pozwoliło to na zgromadzenie niezbędnej, wyjściowej wiedzy o analizowanym obiekcie technicznym w kontekście możliwych uszkodzeń, kryteriów oceny itp.
2. W dalszej kolejności niezbędne było przeprowadzenie badań laboratoryjnych cech eksploatacyjnych taśm i ich złączy w celu analizy nośników informacji o stanie obiektu. Badania te są elementem procedury diagnostycznej, której celem było znalezienie odpowiedzi na pytania: co mierzyć? (w jakim miejscu?), jak wnioskować (stany graniczne)? Wyniki badań laboratoryjnych zostały również wykorzystane do weryfikacji wykonanego modelu numerycznego złącza klejowego taśmy przerośnikowej.
3. Kolejnym zadaniem badawczym było przeprowadzenie analiz symulacyjnych w oparciu o model numeryczny złącza. Do jego opracowania niezbędna jest jednak wcześniejsza realizacja badań laboratoryjnych w celu identyfikacji właściwości wytrzymałościowych materiałów konstrukcji złącza. Zgromadzone dane

laboratoryjne posłużyły do przeprowadzenia symulacji numerycznej stanu naprężenia i odkształcenia w obszarze złącza klejowego modelowanej czteroprzekładkowej taśmy tkaninowo-gumowej.



Rys. 3.1 – Zadania badawcze, cele ich realizacji oraz wzajemne powiązania

4. Przeprowadzenie badań laboratoryjnych wraz z etapem modelowania numerycznego jest elementem tworzenia bazy wiedzy o analizowanym obiekcie. Zgromadzona w ten sposób wiedza, również w kontekście podatności diagnostycznej obiektu została wykorzystana do zaprojektowania odpowiedniej konstrukcji środka diagnostyki, tj. systemu monitorowania stanu złączy taśm

przenośnikowych oraz opracowania zasad jego wykorzystania w systemie działania.

5. Opracowana metoda pomiaru oraz konstrukcja systemu monitorowania w kolejnym zadaniu badawczym została poddana weryfikacji *in situ* w warunkach dołowych kopalni „Bogdanka”. Celem tego zadania badawczego była ocena efektywności zastosowanej metody diagnostycznej w warunkach przemysłowych. Zgromadzone w trakcie pomiarów dane zostały wykorzystane do rozbudowy bazy wiedzy o analizowanym obiekcie.
6. Zerwanie taśmy w obszarze złącza to rodzaj uszkodzenia stopniowego, mającego między innymi przyczynę starzeniową. A więc następuje ono sukcesywnie, przy zmianie cech fizycznych rejestrowanych przez system monitorowania. Istnieje zatem możliwość przewidywania chwili uszkodzenia złącza na określonym poziomie ufności. Dlatego też wynikiem realizacji kolejnego zadania badawczego wykorzystującego opracowany system monitorujący oraz utworzoną bazę wiedzy o obiekcie było opracowanie koncepcji inteligentnego systemu diagnostyki złączy taśm przenośnikowych oraz modułu sterującego z wykorzystaniem logiki rozmytej.

Tak zrealizowane zadania badawcze posłużą osiągnięciu cząstkowych celów naukowych prowadzonych prac, jakimi są:

1. Analiza stanu wiedzy w zakresie konstrukcji oraz metod łączenia taśm przenośnikowych, szczególnie w kontekście nierozwiązanych dotychczas problemów eksploatacyjnych i badawczych.
2. Zbudowanie bazy wiedzy w zakresie użytkowych właściwości taśm przenośnikowych z wykorzystaniem wyników badań laboratoryjnych, pomiarów przemysłowych oraz wyników modelowania numerycznego.
3. Opracowanie metodyki postępowania w zakresie identyfikacji właściwości wytrzymałościowych materiałów konstrukcyjnych złącza klejowego taśmy tkaninowo-gumowej oraz ich modelowania numerycznego w celu eliminacji popełnianych w tym zakresie błędów, uproszczeń oraz rozbieżności w uzyskiwanych wynikach.
4. Opracowanie wiarygodnego i uniwersalnego modelu numerycznego połączenia klejowego taśmy przenośnikowej w oparciu o precyzyjnie określone właściwości wytrzymałościowe modelowanych materiałów, w celu na przykład rozwiązywania problemów odpowiedniego użycia kleju i parametrów połączenia dla uzyskania optymalnych właściwości i cech eksploatacyjnych złącza.
5. Opracowanie metody monitorowania stanu złączy klejowych oraz odcinków taśmy pomiędzy nimi w celu zabezpieczenia przenośnika

taśmowego przed awarią w wyniku zerwania taśmy, stanowiącej jednocześnie element systemu gromadzenia i przetwarzania danych w aspekcie racjonalnej gospodarki taśmami.

6. Opracowanie koncepcji kompleksowego, zintegrowanego komputerowo systemu nadzoru i sterowania transportu taśmowego z wykorzystaniem numerycznego wspomaganie podejmowania decyzji.

Realizacja wymienionych celów i zadań badawczych wymagała przeprowadzenia kompleksowych badań laboratoryjnych, modelowania numerycznego, testów eksploatacyjnych oraz prac analitycznych. Część z uzyskanych w ich efekcie wyników została opublikowana w pracach [133-144]. Wszystkie prace badawcze (badania laboratoryjne, modelowanie, symulacje numeryczne) dla tak określonego celu pracy przeprowadzono dla przypadku typowej, czteroprzekładowej taśmy tkaninowo-gumowej GTP o szerokości 1200 mm oraz jej złącza wykonanego z zastosowaniem kleju TL-T70. W przypadku badań laboratoryjnych każdorazowo sprawdzano hipotezy o równości średnich dla założonego poziomu istotności.

4. Analiza użytkowych właściwości taśm przenośnikowych

Zgodnie z przyjętym celem badawczym pracy obiekt diagnozowania, jakim jest taśma przenośnikowa, będzie podlegać identyfikacji stanu technicznego połączeń jej odcinków dla zapewnienia optymalnej ich trwałości i niezawodności. W zakresie zadania szczegółowego oznacza to monitorowanie, tj. ocenę stanu w danej chwili oraz prognozę wartości analizowanych parametrów. Realizacja takiego zadania wymaga odpowiedniej wiedzy na temat obiektu, charakteryzujących go stanów, wartości cech opisujących zarówno wejścia, jak i wyjścia, co jest warunkiem niezbędnym dla przeprowadzenia wnioskowania diagnostycznego [149, 150]. Wymaga to właściwej identyfikacji oraz organizacji procesu pozyskiwania wiedzy, co nabiera szczególnego znaczenia w przypadku rozpatrywanej problematyki zapewniania trwałości i niezawodności połączeń taśm przenośnikowych. Różne typy taśm i zastosowane metody ich łączenia, zróżnicowane właściwości materiałów składowych połączenia, odmienne warunki pracy i obciążenia transportowanym materiałem oraz wiele innych, w tym problemy natury eksperymentalno-badawczej sprawiają, że mimo dużej liczby dostępnych publikacji, brak jest usystematyzowanej, jednoznacznej i wiarygodnej wiedzy dotyczącej tej specyficznej tematyki. Fakt ten jest przyczyną konieczności przeprowadzenia analizy możliwości pełnego oraz jednoznacznego pozyskania niezbędnej wiedzy, dzięki wykorzystaniu do tego odpowiednich jej źródeł oraz realizacji założonego scenariusza postępowania, co było między innymi celem opisywanych w dalszej części wieloletnich prac badawczych.

W przypadku gromadzenia wiedzy odnośnie połączeń taśm przenośnikowych pierwszym etapem powinien być eksperyment pozwalający na poznanie jakościowe oraz ilościowe specyfiki pracy złącza pod obciążeniem oraz wartości jego wydłużenia w chwili zerwania. Informacje takie możliwe są do pozyskania w trakcie odpowiednio przeprowadzonych badań laboratoryjnych cech eksploatacyjnych taśm przenośnikowych i ich złączy. Konieczność zastosowania w tym przypadku indukcji niepełnej, wynika z faktu, że ze względu na stopień skomplikowania prób laboratoryjnych, ich koszt oraz czasochłonność, nie jest możliwe przeanalizowanie wszystkich możliwych przypadków konstrukcji połączenia i właściwości jego elementów składowych. Jednak nawet niepełne wyniki badań eksperymentalnych pozwalają na pozyskanie wstępnej, ogólnej wiedzy, która może być poszerzona dzięki wykorzystaniu na kolejnym etapie metod numerycznych. Symulacja komputerowa z zastosowaniem metody

elementów skończonych pozwoli w tym przypadku na rozszerzenie zakresu wiedzy poprzez opracowanie modelu numerycznego złącza taśmy oraz analizę występujących w jego obszarze naprężeń i odkształceń. Wyniki tak przeprowadzonej analizy, po ich weryfikacji będą mogły być wykorzystane do wtórnego modelowania alternatywnych konstrukcji połączenia w celu na przykład optymalizacji postaci geometrycznej, identyfikacji pożądanych parametrów wytrzymałościowych materiałów składowych oraz określenia wartości granicznych istotnych atrybutów stanu.

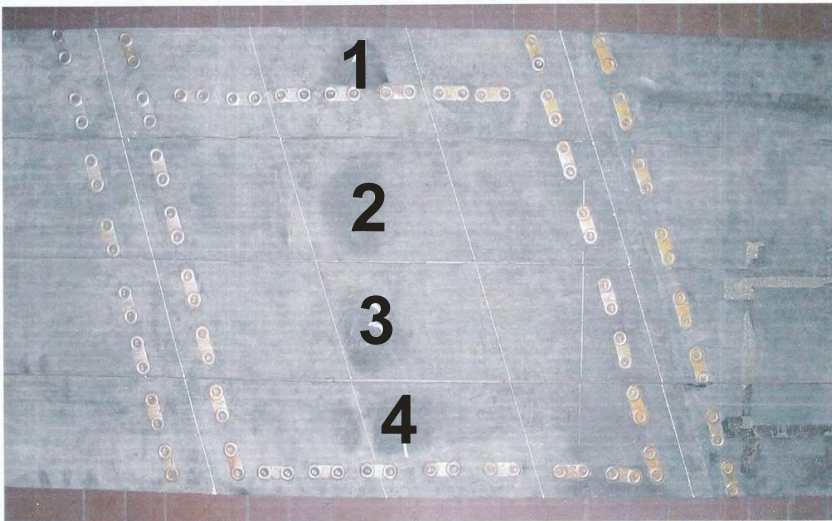
Eksperymenty numeryczne wymagają starannej weryfikacji otrzymanych wyników [205]. Do tego celu zostaną wykorzystane dane zgromadzone na etapie badań laboratoryjnych. Wyniki otrzymane w ten sposób zostaną zastosowane w trakcie kolejnego etapu prac nad konstrukcją oraz metodą działania układu monitorującego oraz oprogramowania do analizy, przetwarzania i wizualizacji danych. Wstępny etap pracy układu monitorującego będzie służył między innymi weryfikacji poprawności działania toru pomiarowego oraz pozwoli na praktyczną, przeprowadzoną w rzeczywistych warunkach przemysłowych obserwację obiektu w celu walidacji wartości granicznych atrybutów stanu.

Taki scenariusz postępowania w trakcie wieloetapowego i kompleksowego pod względem zakresu, jak i zastosowanych metod rozpoznania obiektu, charakterystyki taśm przENOŚNIKOWYCH i ich połączeń gwarantuje zgromadzenie odpowiedniego zasobu wiedzy diagnostycznej. Ze względu jednak na charakter pracy i specyfikę eksploatacyjną transportu taśmowego oraz z powodu zmiennych warunków użytkowania tych urządzeń krytycznych, monitorowanie oraz przetwarzanie danych musi być realizowane w czasie rzeczywistym. A to z kolei oznacza konieczność gromadzenia i przetwarzania dużych ilości danych. Konieczne, zatem stanie się również opracowanie odpowiedniej koncepcji systemu wspomagania wnioskowania diagnostycznego.

4.1. Badania laboratoryjne cech eksploatacyjnych taśm i ich złączy

Połączenia taśm przENOŚNIKOWYCH badane są w warunkach laboratoryjnych opisanymi wcześniej metodami statycznymi lub dynamicznymi. Warunki badań połączeń taśm przENOŚNIKOWYCH określone są przez odpowiednie normy międzynarodowe. Badania te w większości przypadków wymagają stosowania specjalnych urządzeń i stanowisk pomiarowych, w tym poziomych maszyn wytrzymałościowych, posiadających możliwość zerwania rzeczywistych rozmiarów próbki złącza z taśmą (około 2 metrów długości), o dość dużej wartości wydłużenia w chwili zerwania. Dodatkową trudnością jest fakt istnienia

na rynku szeregu typów taśmy i rodzajów połączeń, często o znacznie różniących się właściwościach. Różnice w cechach wytrzymałościowych mogą również występować w tej samej klasie taśm i połączeń, lecz wykonywanych w innym okresie czasu, na przykład z nieco odmiennego materiału bazowego lub ze zmodyfikowanymi dodatkami. Poznanie cech eksploatacyjnych połączeń taśm przenośnikowych o różnej konstrukcji, w tym takich, które wykonywane są bezpośrednio w warunkach przemysłowych wymaga odrębnych, indywidualnych badań laboratoryjnych. Szczególnie istotne są takie badania dla oceny wytrzymałości i wydłużalności połączeń taśm, z punktu widzenia możliwości monitorowania ich parametrów bezpośrednio w warunkach przemysłowych tak, aby wyeliminować zagrożenie nieprzewidzianego zerwania taśmy w obszarze połączenia.



Rys. 4.1 - Widok podziału złącza na próbki pomiarowe A/1 – A/4 [14]

W związku z powyższym stosownie do określonego przez autora celu i zakresu pomiarów w Instytucie Górnictwa Politechniki Wrocławskiej przeprowadzone zostały badania laboratoryjne [14, 15] połączeń przygotowanych w LW Bogdanka. Zakres pomiarów laboratoryjnych obejmował między innymi pomiar wartości wydłużenia złącza w chwili zerwania, pomiar wydłużenia całej próbki (złącze klejowe + taśma) w chwili zerwania oraz analizę przebiegu wydłużenia złącza przy obciążeniu do momentu zerwania zgodnie z wymogami normy. W pomiarach laboratoryjnych [138, 140, 141, 144] wykorzystano dla porównania dwa rodzaje połączeń taśm – wykonując pomiary podzielone na dwa etapy (etap A i etap B).

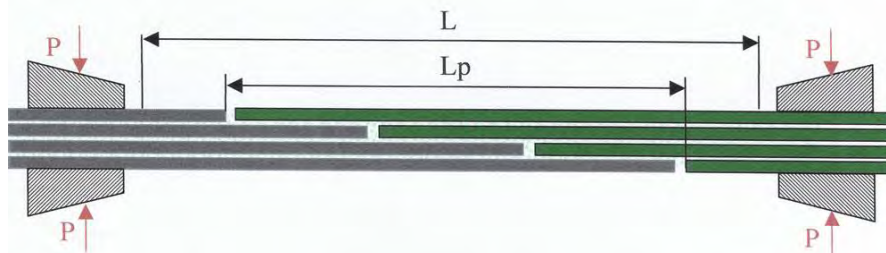
W pierwszym etapie badania laboratoryjne przeprowadzono dla przypadku złącza taśmowego wykonanego metodą klejenia ze wzmocnieniami mechanicznymi. Połączenie wykonane było przy użyciu taśmy czteroprzędkowej tkaninowo-gumowej o szerokości $B=1200$ mm. Użyte do badania złącze o długości 3950 mm było wcześniej eksploatowane przez znaczny okres czasu w warunkach dołowych kopalni LW Bogdanka i posiadało liczne uszkodzenia okładek gumowych i rdzenia taśmy (rys. 4.1). Wykonano z niego próbki oznaczone jako A/1, A/2, A/3 oraz A/4.

Dodatkowe badania (etap drugi) wykonano wykorzystując trzy kolejne, typowe połączenia klejowe (klasyczne, bez wzmocnienia mechanicznego) oznaczone jako B/I, B/II oraz B/III, przy czym pierwsze dwa były połączeniami nowymi, wykonanymi zgodnie z zaleceniami wewnętrznymi producenta kleju z przeznaczeniem specjalnie do celów badawczych, a złącze o identyfikatorze B/III było wcześniej eksploatowane przez ponad dwa miesiące w warunkach dołowych na typowym przenośniku odstawy głównej. Połączenia dostarczone do badań w tym przypadku miały wymiary: szerokość 1200 mm, długość 1900 mm (połączenia B/I i B/II) oraz szerokość 1200 mm i długość 2800 mm (połączenie B/III). Wszystkie badane złącza taśmowe wykonane były metodą klejenia dla taśmy czteroprzędkowej przy użyciu kleju firmy NILOS. Wykonanie badań złączy ze wzmocnieniami mechanicznymi oraz bez wzmocnień, przy jednoczesnym zróżnicowaniu ich wcześniejszego okresu eksploatacji miało na celu umożliwienie przeprowadzenia analizy porównawczej wpływu metody wykonania połączenia oraz jego ewentualnego zużycia na wytrzymałość.

Zgodnie z wymaganiami normy PN-C-94147:1997 [155] do badań wytrzymałościowych na rozciąganie w pierwszym etapie należało wyciąć ze złącza próbki o szerokości 200 mm. Z uwagi na wzmocnienia mechaniczne złącze pocięto wzdłużnie tak, aby linie cięć nie przechodziły przez elementy łączące, ponieważ obniżyłoby to wytrzymałość poszczególnych próbek. Istotne to było również z powodu sformułowania dodatkowego celu badań, którym było określenie, w jaki sposób zastosowanie wzmocnienia mechanicznego w obszarze złącza wpływa na zmianę jego wytrzymałości. Ogólnie wiadomym jest, bowiem fakt, że w typowych konstrukcjach połączeń, klej, jako uzupełnienie na przykład nitów wyraźnie zwiększa wytrzymałość zmęczeniową takiego elementu.

Po obciążeniu uszkodzonych obrzeży taśmy uzyskano w ten sposób 4 próbki do badań (oznaczone jako A1-A4), z których w jednej (próbka nr A/2) taśma posiadała eksploatacyjne uszkodzenie w postaci przebicia na wylot znajdującego się około 400 mm od krawędzi złącza. Przyjęte oznaczenia długości badanych próbek pokazano na rys 4.2. W drugim etapie badań laboratoryjnych należało wyciąć ze złącza próbki o szerokości 200 mm, wykonując po pięć próbek z każdego złącza (oznaczone jako B/I/1 do B/I/5 itd.). Badania laboratoryjne przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej ZP-40 [14, 15].

Prędkość rozciągania wynosiła 100 mm/min. Przebieg rozciągania rejestrowała maszyna wytrzymałościowa zaopatrzona w odpowiedni program komputerowy. Wydłużenie złącza L_p mierzono przy użyciu milimetrowego przymiaru i cyfrowej kamery video umieszczonej nad stykiem złącza od strony nieruchomej szczęki zrywarki.



Rys. 4.2 – Oznaczenia wymiarowe złącza [14, 15]

Linie tego styku zaznaczono na okładce taśmy, a milimetrowy przymiar utwierdzono na linii drugiego styku złącza. Wydłużenie całkowite mierzono przy użyciu drugiego przymiaru milimetrowego i aparatu cyfrowego, sprzężonego z kamerą video. Pozwalało to na zapis wydłużeń obydwu mierzonych wielkości równocześnie ze wskazaniem siłomierza. Zestawienie otrzymanych wyników tak przeprowadzonych badań laboratoryjnych prezentuje tabela 4.1 (etap 1 badań) oraz tabela 4.2 (etap 2 badań).

Tabela 4.1 – Wyniki badań wytrzymałości i wydłużalności złącza i taśmy – etap pierwszy badań (złącze klejowe ze wzmocnieniami mechanicznym, wcześniej eksploatowane) [140, 141]

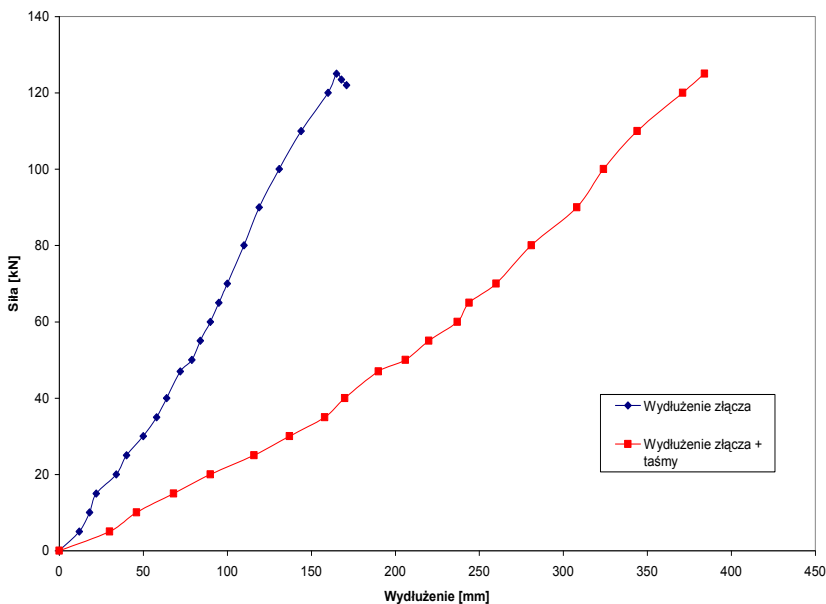
Numer próbki	A/1	A/2	A/3	A/4
Szerokość próbki, b [mm]	242	264	252	252
Siła zrywająca, F [kN]	125,3	112,4	103,8	104,6
Wytrzymałość na rozciąganie, R [kN/m]	518	426	412	413
Długość początkowa złącza, L_p [mm]	1100	1105	1110	1115
Wydłużenie złącza w chwili zerwania, ΔL_p [mm]	167	152	154	163
Wydłużenie złącza w chwili zerwania, ΔL_p [%]	15,18	13,75	13,87	14,62
Długość początkowa pomiarowej części próbki, L [mm]	2910	2907	2903	2900
Wydłużenie pomiarowej długości w chwili zerwania, ΔL_p [mm]	383	335	365	342
Wydłużenie pomiarowej długości w chwili zerwania, ΔL_p [%]	13,16	11,52	12,57	11,79

Tabela 4.2 – Wyniki badań wytrzymałości i wydłużalności złącza klejowego i taśmy – etap drugi badań (połączenie bez wzmocnienia mechanicznego, nowe oraz częściowo eksploatowane) [141]

Numer próbki	B/I/1	B/I/2	B/I/3	B/I/4	B/I/5	B/II/1	B/II/2	B/II/3	B/II/4	B/II/5	B/III/1	B/III/2	B/III/3	B/III/4	B/III/5
Szerokość próbki, b [mm]	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
Siła zrywająca, F [kN]	167,2	189,8	203,7	167,9	186,4	187,1	161,1	174,4	169,4	192,2	139,8	176,4	165,1	152,2	184,0
Wytrzymałość na rozciąganie, R [kN/m]	836,0	949,0	1018,5	839,5	932,0	935,5	805,5	872,0	847,0	961,0	699,0	882,0	825,5	761,0	924,0
Wytrzymałość na rozciąganie, R_S [kN/m]	915,0					884,2					818,0				
Długość początkowa złącza, L_p [mm]	995,0					1002,0					922,0				
Przyrost długości, ΔL_p [mm]	199	208	213	201	205	230	218	225	219	240	174	190	182	171	180
Przyrost długości, (wartość średnia) ΔL_{p_p} [mm]	205,2					226,4					180,0				
Wydłużenie pomiarowej długości w chwili zerwania, ΔL_p [%]	20,6					22,6					19,0				

W przypadku próbek numer A/1 i numer A/4 (pierwszy etap badań) zerwanie nastąpiło na styku pierwszego i drugiego stopnia. Próbka numer A/3 zerwała się na styku drugiego i trzeciego stopnia, a zerwanie próbki numer A/2 nastąpiło poza złączem, co było efektem jej wcześniejszego uszkodzenia eksploatacyjnego.

Na rysunku 4.3 przedstawiono wydłużenie złącza w porównaniu do wydłużenia złącza z odcinkiem taśmy w zależności od wartości siły w trakcie próby. Kolejny rysunek (rys. 4.4) prezentuje tę samą zależność, w tym przypadku – wydłużenia procentowego.

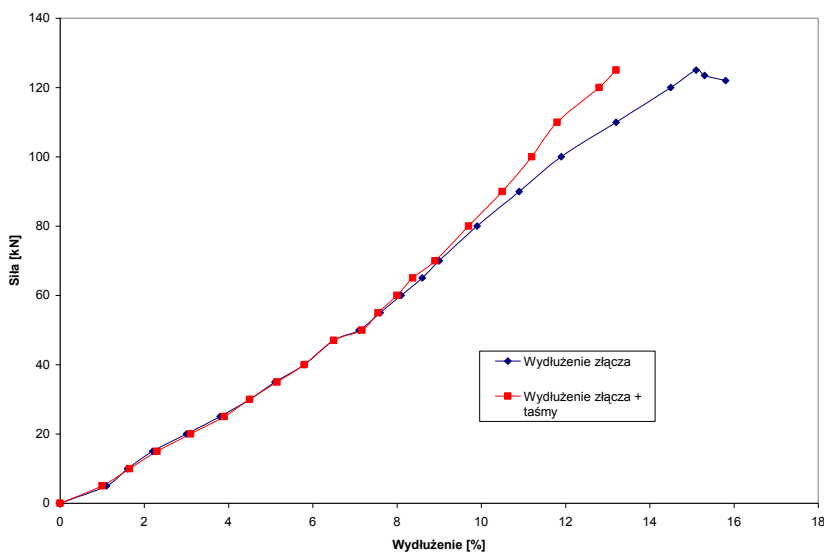


Rys. 4.3 - Wydłużenie przykładowego złącza w porównaniu do wydłużenia tego złącza wraz z odcinkiem taśmy, w zależności od wartości siły w trakcie próby [141]

Wyniki przeprowadzonych badań laboratoryjnych pozwalają na uzyskanie informacji na temat analizowanych połączeń w aspekcie ich wytrzymałości oraz umożliwiają odniesienie się do danych dotyczących teoretycznej wytrzymałości złącza klejowego.

Jak wspomniano wcześniej, teoretyczna wytrzymałość złącza klejowego dla czterech przekładek wynosi 75% wytrzymałości nominalnej taśmy. W przypadku połączeń mechanicznych teoretyczna wytrzymałość różnych ich typów odpowiednio dobranych do wytrzymałości taśmy wynosi średnio 60% wytrzymałości nominalnej taśmy. W trakcie przeprowadzonych badań laboratoryjnych uzyskano natomiast wyniki znacznie niższe od wartości

teoretycznych. Dla analizowanych próbek ich wytrzymałość na rozciąganie wahała się od 25% do 32% nominalnej wytrzymałości taśmy na rozciąganie w kierunku wzdłużnym. Tak niska wartość mogła być spowodowana częściowym zużyciem eksploatacyjnym taśmy, z której pochodziła badana pierwsza próbka. Nieco lepsze wyniki uzyskano w przypadku wydłużenia procentowego w chwili zerwania. Dla badanych próbek połączenia wynosiła ona od 13,75% do 15,18%, co jest wartością większą od minimalnego wydłużenia materiału samej taśmy w chwili zerwania, które zgodnie z wymaganiami powinno wynosić minimum 10%.



Rys. 4.4 - Wydłużenie przykładowego złącza w porównaniu do wydłużenia tego złącza wraz z odcinkiem taśmy, w zależności od wartości siły w trakcie próby [141]

Wielkością istotną z punktu widzenia potencjalnego układu monitorującego jest wartość wydłużenia procentowego w chwili zerwania dla złącza wraz z odcinkiem taśmy znajdującym się w jego otoczeniu. Wynika to z konieczności wskazania przyszłego miejsca montowania znaczników układu monitorującego oraz określenia wartości sygnałów alarmowych. W przypadku konieczności zamontowania znacznika w obszarze złącza, jego obecność mogłaby mieć znaczący wpływ na obniżenie wytrzymałości połączenia. Znacznie wygodniejsze z punktu widzenia potrzeb eksploatacyjnych byłoby montowanie znaczników w obszarze poza złączem, co dodatkowo pozwalałoby na zróżnicowanie miejsca ich montażu w celu ułatwienia późniejszej identyfikacji połączeń. W trakcie badań wydłużenie pomiarowej długości złącza

w chwili zerwania osiągnęło wartości nieco mniejsze od wydłużenia samego złącza, co jest prostą konsekwencją różnicy wytrzymałości na rozciąganie obszaru złącza oraz obszaru złącza z dodatkowymi odcinkami taśmy po obu stronach. Uzyskane wartości nie różniły się jednak znacznie i były wzajemnie proporcjonalne (rys. 4.4).

W badaniach laboratoryjnych użyto próbek pochodzących z eksploatowanej wcześniej taśmy, z których jedna (próbka numer 2) posiadała zauważalne uszkodzenia eksploatacyjne mające postać przebiccia na wylot. Mimo tego uszkodzenia nie zanotowano istotnego obniżenia wytrzymałości tej próbki w stosunku do pozostałych. Uszkodzona próbka złącza osiągnęła poziom 13,75% wydłużenia w chwili zerwania, co było wynikiem niemal identycznym, jak w przypadku próbki numer 3 (wydłużenie równe 13,87%) oraz niewiele niższym od najbardziej wytrzymałej z badanych próbek (15,18%).

Podobnie było w przypadku wytrzymałości na rozciąganie, która dla uszkodzonej próbki numer 2 osiągnęła wartość 426 kN/m oraz wartość siły zrywającej (112,4 kN). Pozostałe badane próbki zostały zerwane przy sile zrywającej wynoszącej od 125,3 kN do 103,8 kN, a ich wytrzymałość na rozciąganie wynosiła od 518 kN/m do 412 kN/m.

Jak wspomniano wcześniej - teoretyczna wytrzymałość złącza klejowego dla czterech przekładek wynosi 75% wytrzymałości nominalnej taśmy. Jednak w trakcie przeprowadzonych badań laboratoryjnych (etap 2) uzyskano ponownie wyniki nieco niższe od wartości teoretycznych. Dla analizowanych próbek ich wytrzymałość na rozciąganie wahała się od 50% do 57% nominalnej wytrzymałości taśmy na rozciąganie w kierunku wzdłużnym, przy czym najniższą wartość uzyskano dla próbki nr III – eksploatowanej przed wykonaniem badań przez okres kilku miesięcy. Tak niska wartość wytrzymałości na rozciąganie mogła być, zatem spowodowana częściowym zużyciem eksploatacyjnym taśmy, z której pochodziła badana próbka, chociaż rzeczywistą przyczyną była tu raczej gorsza, jakość wykonania połączenia. Fakt ten nie miał jednak zbyt dużego wpływu na uzyskany wynik, o czym świadczą niemal zbliżone, o kilka procent większe wartości uzyskane w czasie badania próbek nowych.

Ponownie, również nieco lepsze wyniki uzyskano w przypadku wydłużenia procentowego w chwili zerwania, podobnie jak podczas pierwszego etapu badań laboratoryjnych. Dla badanych próbek złącza wynosiło ono od 19,5% do 22% (w pierwszym etapie badań wartości te wynosiły odpowiednio od 13,75% do 15,18%). Przy czym wartość tego parametru dla taśmy eksploatowanej oraz nowej jest niemal identyczna, co świadczy o dobrym zachowaniu cech wytrzymałościowych taśmy i połączenia mimo wcześniejszego intensywnego ich eksploatowania w warunkach przemysłowych.

Wielkością istotną z punktu widzenia zakładanej koncepcji układu monitorującego jest właśnie wydłużenie odcinka złącza wraz z ze znajdującym

się w jego otoczeniu fragmentem taśmy oceniane w chwili zerwania. W trakcie badań wydłużenie procentowe pomiarowej długości złącza (złącze + odcinki taśmy poza złączem) w chwili zerwania osiągnęło wartości nieco mniejsze od wydłużenia procentowego samego złącza, co jest konsekwencją różnicy wytrzymałości na rozciąganie obszaru złącza oraz obszaru złącza z dodatkowymi odcinkami taśmy po obu stronach. Uzyskane wartości nie różniły się jednak znacznie i były proporcjonalne, wynosząc od 19,5% do 22% w przypadku złącza oraz odpowiednio 18,2% do 21,9% w przypadku pomiaru złącza z odcinkami taśmy po obu jego stronach.

4.2. Model numeryczny złącza klejowego taśmy przENOŚnikowej

Identyfikacja naprężeń i odkształceń w spoinie klejowej z zastosowaniem metody elementów skończonych stanowiąca kolejne zadanie badawcze, zgodnie z wnioskami z przeprowadzonej analizy, wymaga przeprowadzenia przygotowawczych badań laboratoryjnych. Badania te zrealizowane zostały według opracowanego planu pomiarów i z zastosowaniem odpowiedniego stanowiska pomiarowego w Politechnice Lubelskiej, w sposób umożliwiający eliminację błędów wynikających ze zwyczajowych uproszczeń [138].

Typowym uproszczeniem, a zarazem błędem w przygotowaniu modeli materiałowych dla gumy jest przeprowadzanie prób wytrzymałościowych dla określenia naprężeń i odkształceń w odniesieniu do początkowej wartości przekroju poprzecznego próbki. Duże, z reguły nieanalizowane przewężenie próbki w czasie badań wytrzymałościowych w istotny sposób wpływa na niedokładność modelu MES analizowanej konstrukcji. Dlatego też w trakcie realizacji pracy koniecznym było przeprowadzenie prób laboratoryjnych w celu identyfikacji cech wytrzymałościowych analizowanych materiałów, w sposób eliminujący niedokładność modelu MES. W niniejszej pracy przyjęto założenie, że analizowane i modelowane będzie połączenie taśmy tkaninowo-gumowej czteroprzędawkowej, jako jedno z częściej stosowanych w warunkach przemysłowych [29, 97]. Stosownie do tego założenia, laboratoryjne prace badawcze, jak i identyfikację cech materiałowych na potrzeby modelowania numerycznego MES wykonano z wykorzystaniem próbek taśm, elementów budowy taśmy i połączenia używanych do produkcji taśmy trudno palnej (typ 1600), znajdującej się w katalogu wyrobów FTT Stomil Wolbrom S.A., w tym próbek tego typu taśm eksploatowanych przez firmę LW Bogdanka S.A. Z analogicznych taśm wykonane były próbki wykorzystane do wcześniejszych badań laboratoryjnych wytrzymałości złączy klejowych.

Celem analizy numerycznej jest między innymi ocena możliwości wykorzystania opracowanego modelu MES połączenia do prognozowania trwałości i wytrzymałości złącza, jak i możliwości jego zastosowania na etapie konstrukcyjnego projektowania połączenia. Można spodziewać się, że zastosowanie w tym przypadku symulacji numerycznej w oparciu o MES umożliwi dokładną analizę rozkładów naprężeń w obszarze złącza klejowego wybranej taśmy przenośnikowej, pozwalając tym samym na określenie miejsc występowania ich koncentracji, czy też niekorzystnego z punktu widzenia trwałości złącza rozkładu naprężeń. Uważa się bowiem [46], że metoda elementów skończonych może być traktowana, jako istotne rozszerzenie i uzupełnienie metod analitycznych oceny stanu naprężenia i odkształcenia, pozwalając jednocześnie na wiarygodne i precyzyjne określenie udziału poszczególnych składowych naprężenia, co z reguły stanowi istotną informację przy projektowaniu i optymalizacji połączeń klejowych. Nie bez znaczenia jest również możliwość prognozowania wytrzymałości połączeń klejowych o różnej geometrii i parametrach materiałów składowych bez konieczności stosowania kłopotliwych i kosztownych w przypadku taśm przenośnikowych badań niszczących.

4.2.1. Identyfikacja właściwości wytrzymałościowych materiałów złącza

Jednym z opisanych wcześniej, istotnych etapów tworzenia kompleksowej bazy wiedzy na potrzeby diagnostyki taśm przenośnikowych jest rozwiązanie problemu prawidłowej identyfikacji właściwości wytrzymałościowych materiałów gumowych wchodzących w skład połączenia klejowego przenośnikowej taśmy tkaninowo-gumowej. Ten specyficzny przykład zastosowania w jednej konstrukcji materiałów gumowych o różnych właściwościach, mających postać dwóch typów gumowych warstw taśmy przenośnikowej z przekładkami tkaninowymi, dodatkowo w postaci połączenia wykonanego z zastosowaniem kleju kauczukowego jest istotnym problemem konstrukcyjno-eksploatacyjnym. Jednocześnie stanowi reprezentatywny przykład istotności analizowanego problemu dla odpowiedniej wiarygodności i powtarzalności wyników prowadzonych badań laboratoryjnych oraz bazujących na nich analiz numerycznych dla oceny trwałości, jakości, czy też przydatności wyrobu gumowego.

Metody badania cech fizycznych gumy zostały na przestrzeni ostatnich lat znacząco udoskonalone oraz ujednolicone. Większość z nich opiera się na normach międzynarodowych, szczególnie w odniesieniu do badań

podstawowych i stosowanych. Celem normalizacji była w pierwszej kolejności konieczność zagwarantowania porównywalności wyników badań przeprowadzanych w kontekście kontroli jakości. Korzystając z otrzymanych w ten sposób danych w przypadku zastosowania ich do modelowania numerycznego, w tym szczególnie do odwzorowania właściwości wytrzymałościowych modelowanych materiałów gumowych, należy mieć świadomość ograniczeń wynikających z tego faktu. Problemem z punktu widzenia modelowania numerycznego są tu bowiem stosowane w takich badaniach, dopuszczane w normach uproszczenia. Wynikają one głównie z ograniczeń warunków laboratoryjnych, konieczności zastosowania skomplikowanej i kosztownej aparatury pomiarowej lub też z braku potrzeby bardziej precyzyjnej analizy. Otrzymane w ten sposób dane, pozwalają wprawdzie na miarodajne porównywanie wyników w aspekcie na przykład wspomnianej kontroli jakości, to jednak nie nadają się do zastosowania w dalszych badaniach cech eksploatacyjnych realizowanych z wykorzystaniem metod numerycznych, w tym w szczególności metody elementów skończonych. Przykładem takiego przypadku jest między innymi konieczność odpowiedniego określenia w pełnym zakresie właściwości wytrzymałościowych materiałów gumowych przy rozciąganiu, na potrzeby ich modelowania w analizie konstrukcji gumowych prowadzonych z zastosowaniem metody elementów skończonych. Dowolność przyjmowanych w modelowaniu charakterystyk wytrzymałościowych lub ich elementów, czy też błędy popełniane w trakcie badań laboratoryjnych materiałów gumowych, skutkują małą wiarygodnością oraz niską przydatnością otrzymywanych w ten sposób wyników modelowania numerycznego.

Definiowanie właściwości wytrzymałościowych materiałów, z których wykonywane są połączenia taśm przenośnikowych, z pewnym przybliżeniem lub ich przyjmowanie na podstawie uniwersalnych tabel, to jedna z przyczyn późniejszej niedokładności opracowywanych modeli MES. Innym źródłem niedokładności etapu modelowania numerycznego jest budowanie modeli materiałowych dla gumy w oparciu o klasyczne, jednoosiowe próby rozciągania.

W standardowych zastosowaniach, do obliczenia wytrzymałości na rozciąganie przyjmuje się umownie powierzchnię początkowego przekroju poprzecznego próbki, która jest większa od przekroju rzeczywistego w danej chwili odkształcenia próbki [159]. W ten sposób, dzieląc siłę przez początkowe pole przekroju uzyskujemy wartość naprężenia umownego lub inaczej nominalnego. W celu wyznaczenia rzeczywistej wartości naprężenia, to jest z uwzględnieniem odkształcenia próbki w trakcie badania, należy do obliczeń przyjąć rzeczywiste wartości pola przekroju poprzecznego odpowiadające wartości działającej w danej chwili siły. Możliwe jest to jedynie w przypadku uwzględnienia zmniejszania się pola przekroju poprzecznego, co poza standardowym pomiarem siły wymaga dodatkowego, zintegrowanego pomiaru zmiany geometrii próbki z odpowiednią częstotliwością próbkowania.

To zwyczajowe, zgodne z normami umowne uproszczenie, w istotny sposób wpływa na późniejszą niedokładność modelu MES konstrukcji gumowej, opracowanego w oparciu o wyniki prób wytrzymałościowych, ponieważ do analiz przyjmowane są mniejsze od rzeczywistych wartości naprężenia. Dlatego też jest istotnym, aby identyfikacja właściwości wytrzymałościowych materiałów gumowych wykonywana była metodą gwarantującą pomiar rzeczywistej wartości przekroju poprzecznego próbki w danym momencie jej odkształcenia.

Pewnego rodzaju komplikacje, czy też pomyłki w przygotowywaniu zestawu danych do modelowania numerycznego taśm przenośnikowych i ich złączy są również wynikiem korzystania z wartości publikowanych w certyfikatach jakości, pochodzących z badań przeprowadzanych w tym celu przez laboratoria przedsiębiorstw produkujących taśmy przenośnikowe. Badania te wykonywane w oparciu o normy zastępujące wcześniejsze normy branżowe, dostosowane są do specyficznych wymogów badań jakościowych i odbiorczych gotowych wyrobów gumowych danego sektora przemysłu. Zgodnie z normą [155] oznaczając przykładowo wytrzymałość na rozciąganie złącza taśmy przenośnikowej, wynik pomiaru należy obliczyć w kiloniutonach na metr, dzieląc siłę zrywającą przez szerokość próbki, a nie przez pole jej przekroju poprzecznego.

a)

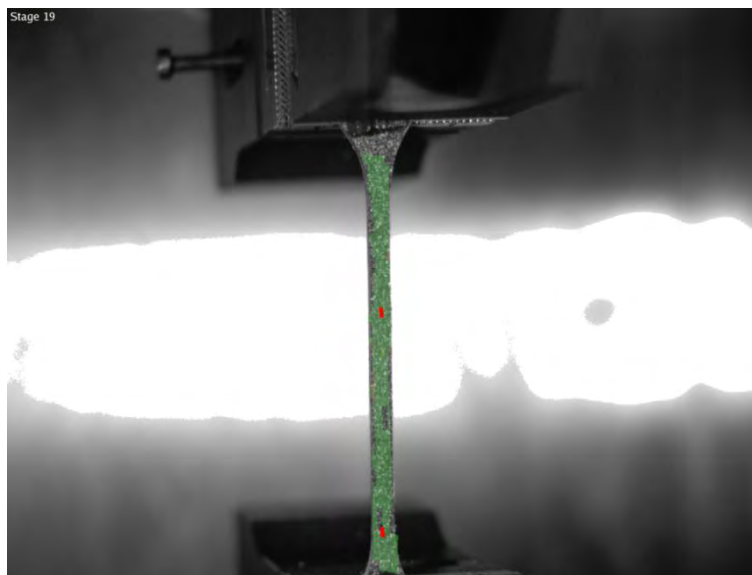


b)



Rys. 4.5 - Stanowisko do badań wytrzymałościowych: a) – próbka podczas rozciągania, b) widok ogólny stanowiska

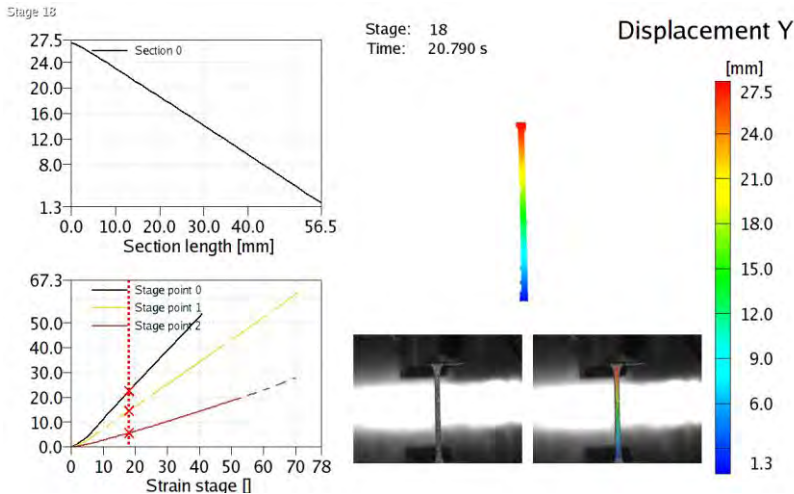
W przypadku połączenia klejowego analizowanej w pracy taśmy przenośnikowej, traktowanego, jako ciało anizotropowe (sandwiczowe) niezbędne było przeprowadzenie badań wytrzymałościowych materiałów wchodzących w skład złącza w celu przygotowania odpowiednich danych wejściowych dla modelu MES. Konieczność ta wynikała z dwóch podstawowych powodów – braku wiarygodnych danych na temat materiałów stosowanych przy wykonaniu połączenia oraz z dużej ich zmienności, szczególnie w przypadku mieszanek gumowych. W związku z powyższym badaniom doświadczalnym poddano cztery rodzaje materiałów wchodzących w skład złącza analizowanej taśmy czteroprzekładkowej o szerokości 1200 mm. Były nimi odpowiednio przygotowane próbki mieszanki przekładkowej (guma warstw zewnętrznych o gęstości $1,322 \text{ g/cm}^3$, oznaczona jako PR), mieszanki rdzeniowej (guma warstw międzyprzekładkowych, guma wewnętrzna o gęstości $1,505 \text{ g/cm}^3$, oznaczenie RDZ), tkaniny stanowiącej warstwy przekładkowe (tkanina EPW-400) oraz próbki z kleju TL-T70 produkcji firmy Nilos.



Rys. 4.6 - Obraz z kamery systemu optycznego rejestracji w trakcie próby rozciągania próbki z gumy

Badania laboratoryjne [137, 138] wykonywano w Politechnice Lubelskiej na stanowisku wyposażonym w maszynę wytrzymałościową Zwick (model Z100/SN3A o klasie dokładności 1), rozbudowaną o optyczny system analizy deformacji 3D (rys. 4.5), którego zastosowanie umożliwiło

trójwymiarową analizę odkształcenia próbek z materiałów gumowych (rys. 4.6). Metodyka przeprowadzonych badań była zgodna z normami [157, 159].

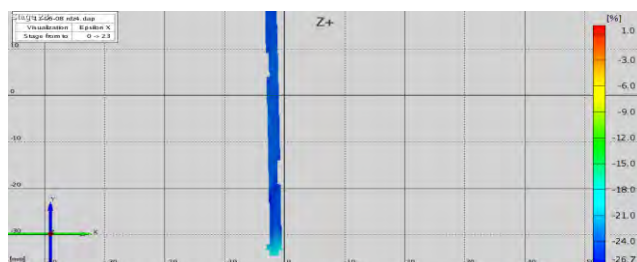


Rys. 4.7 Przykładowa wizualizacja wyników pomiaru dla przypadku rozciąganej próbki z gumy rdzeniowej

W wyniku przeprowadzonych badań, po odpowiednim przetworzeniu danych pomiarowych możliwe było wykonanie wykresów rozciągania analizowanych materiałów $\sigma = f(\varepsilon)$ w odniesieniu do rzeczywistej wartości powierzchni przekroju poprzecznego próbki w dowolnej chwili rozciągania. Uzyskane dane stanowiły podstawę do dalszych badań, w tym doboru odpowiednich modeli analizowanych materiałów oraz zbudowania poprawnego modelu połączenia klejowego czteroprzekładowej taśmy tkaninowo-gumowej. Taki sposób postępowania miał na celu również przeprowadzenie eksperymentu numerycznego wspierającego wnioskowanie diagnostyczne. Z racji specyfiki materiałów gumowych, podlegających w trakcie rozciągania znacznemu wydłużeniu (rys. 4.7), a tym samym istotnej zmianie przekroju poprzecznego próbki, konieczne stało się przeprowadzenie pomiaru tego parametru w każdej chwili próby wytrzymałościowej (rys. 4.8).

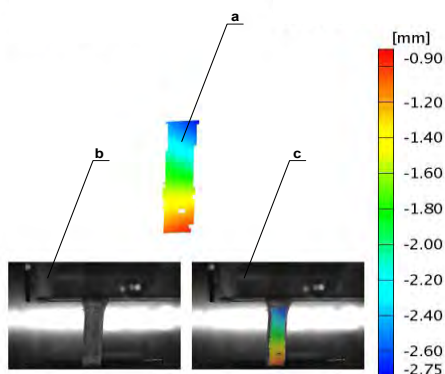
Producenci klejów stosowanych przy łączeniu taśm przenośnikowych nie ujawniają ich cech wytrzymałościowych, ani innych istotnych parametrów mających wpływ na ocenę stanu wytężenia złącza. Przeprowadzenie badań wytrzymałościowych próbek kleju (rys. 4.9) stosowanego przy wykonywaniu złączy analizowanej taśmy przenośnikowej było konieczne dla określenia cech

tego materiału, niezbędnych do pozyskania, jako dane wejściowe do modelu MES.



Rys. 4.8 - Procentowa zmiana szerokości próbki w trakcie rozciągania gumy rdzeniowej w chwili $t=25s$

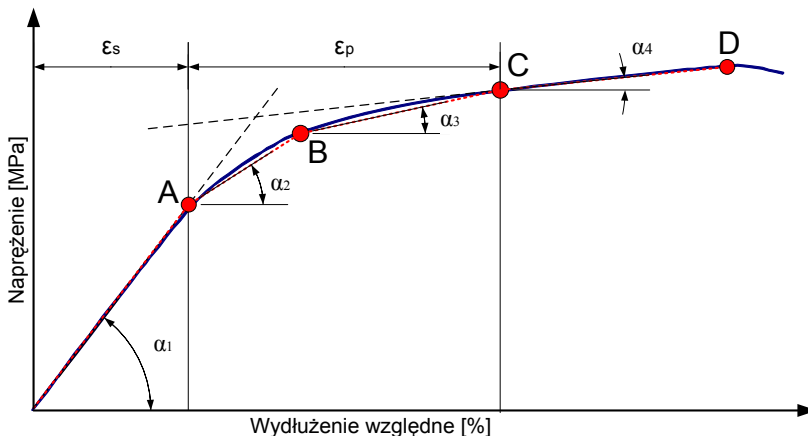
Otrzymana w trakcie badań laboratoryjnych krzywa rozciągania próbek kleju (rys. 4.10), zgodnie z charakterystyką tego typu materiałów o różnych właściwościach mechanicznych [71], pozwala zakwalifikować ten materiał do grupy klejów będących w stanie zbliżonym do wysokoelastycznego, co jest typową cechą klejów kauczukowych. Przebieg krzywej w przypadku tego typu materiału charakteryzuje się znacznie mniejszym kątem pochylenia krzywej rozciągania w porównaniu do materiałów w stanie szklistym i stanie pośrednim pomiędzy szklistym i wysokoelastycznym. Charakteryzuje się również dużymi wartościami maksymalnego odkształcenia względnego. W przypadku klejów występujących w stanie szklistym, krzywa ta niemal pionowo biegnie do maksymalnej wartości naprężenia w małym przedziale wartości odkształcenia względnego, a następnie osiąga wartości maksymalne [70, 71].



Rys. 4.9 - Wizualizacja wyników rozciągania próbki kleju (analiza wydłużenia punktów na powierzchni próbki w 23. sekundzie próby): a) obraz graficzny wydłużenia próbki, b) obraz z kamery (próbka w uchwytach maszyny wytrzymałościowej), c) obraz z kamery przetworzony graficznie

Tworzywa mogą mieć wyraźnie zaznaczony rozwój odkształceń wysokoplastycznych i wówczas granicę plastyczności wyznacza największe naprężenie, występujące przy przegięciu krzywej naprężenie – odkształcenie. Tworzywa, jak w przypadku przedstawionym na rysunku 4.10, mogą mieć również łagodnie narastające odkształcenie wysokoplastyczne. W tym przypadku wprowadza się pojęcie umownej granicy plastyczności [188], którą jest naprężenie wywołujące w tworzywie małe, umownie przyjęte odkształcenie trwałe – plastyczne, a odkształcenie wysokoplastyczne obliczane jest jako suma odkształcenia sprężystego (ϵ_s) i odkształcenia plastycznego (ϵ_p).

Przy analizie wytrzymałości połączeń klejowych poddanych długotrwałemu obciążeniu lub też połączeń wykonanych z zastosowaniem klejów wykazujących właściwości elastyczne konieczne jest uwzględnienie w modelu MES ich odpowiednich właściwości. W analizie połączeń klejowych przyjmowane jest również zwyczajowo założenie liniowo-sprężystych właściwości klejów. Obarcza to jednak otrzymane wyniki dużym błędem, podobnie jest też w przypadku klejów plastycznych, co ma szczególnie negatywny wpływ na wyniki ich modelowania [71].



Rys. 4.10 - Wykres naprężenia w funkcji odkształcenia dla próbki kleju TL-T70 (wyniki badań laboratoryjnych – linia ciągła) oraz przyjęta do analizy charakterystyka (linia 0-A-B-C-D).

W związku z powyższym do analizy przyjęto interpolację krzywej rozciągania czterema odcinkami prostymi (rys. 4.10), z których odcinek 0-A reprezentuje zakres sprężysty charakterystyki analizowanego materiału ($E=90$ MPa, $\nu=0.4$), a odcinki A-B i B-C o różnych wartościach kąta ich nachylenia modelują zakres plastyczny, zapewniając w ten sposób bardziej dokładne odwzorowanie charakterystyki wytrzymałościowej materiału w jego modelu numerycznym.

Precyzyjne informacje na temat cech wytrzymałościowych klejów, w tym szczególnie klejów kauczukowych są niezwykle istotne dla poprawnego opracowania modelu MES połączenia. Jak stwierdza się, bowiem w pracy [71], nieliniowość zależności $\sigma = f(\varepsilon)$ istotnie wpływa na wytrzymałość połączeń klejowych i nie można jej pomijać lub też zastępczo stosować przybliżone wartości parametrów mechanicznych w obliczeniach i analizie wytrzymałości połączeń. Dokładna charakterystyka wytrzymałościowa kleju jest również gwarancją ograniczonych uproszczeń lub błędów modelu MES, typowych

dla modeli przyjmujących jedynie średnie wartości podstawowych parametrów.

Opisane wyżej badania laboratoryjne pozwoliły na określenie precyzyjnych wartości istotnych parametrów wytrzymałościowych oraz odpowiednich charakterystyk analizowanych materiałów wchodzących w skład taśmy i jej złącza klejowego, które zostaną wykorzystane do zbudowania modelu numerycznego. W przypadku tkaniny stanowiącej warstwę przekładkową EPW-400, określono na podstawie analogicznie przeprowadzonych badań laboratoryjnych, że jest to materiał mający średnią wytrzymałość rzędu 485 kN/m. Wartość ta jest zbliżona do średniej wytrzymałości tego typu tkaniny impregnowanej, podawanej przez producenta, jako wynosząca 471 kN/m przy sile zrywającej równej średnio 23,55 kN. Na podstawie przeprowadzonej analizy do modelu przyjęto dla warstwy tkaninowej $E=820$ MPa oraz $\nu=0,3$, co jest wartością zbliżoną do przyjmowanej w badaniach [111], gdzie założono $E=1000$ MPa, i odpowiednio $\nu=0,275$. Tkaninę zamodelowano jako materiał liniowo-sprężysty. W przeprowadzonej analizie wytrzymałości połączenia klej zamodelowano z kolei, jako materiał sprężysto-plastyczny o charakterystyce multilinearnej (rys. 4.10), przyjmując grubość jego warstwy, jako równą 0,4 mm.

Dla porównania, ponieważ w wielu przypadkach klej kauczukowy traktowany jest jako materiał o właściwościach zbliżonych do gumy, obliczenia przeprowadzono również dla kleju analizowanego jako materiał hipersprężysty, zgodny z modelem Mooney-Rivlina [42, 189]. Materiały gumy z warstw zewnętrznych i warstw międzyprzekładkowych zostały zamodelowane zgodnie z danymi określonymi w trakcie opisanych powyżej prób wytrzymałościowych. Wyniki otrzymane podczas badań laboratoryjnych są zbliżone do danych podawanych w literaturze oraz określonych przez producenta taśmy – FTT Wolbrom S.A. Średnie wartości danych wytrzymałościowych otrzymanych podczas prób laboratoryjnych dla gumy z warstw wewnętrznych (RDZ) to między innymi wydłużenie względne w chwili zerwania wynoszące $\varepsilon = 652\%$, siła zrywająca $F=42,22$ N oraz wytrzymałość na rozciąganie $\sigma = 8,44$ kN/m. Średnie wartości tych parametrów podawane przez producenta wynoszą odpowiednio: $\varepsilon = 468\%$, $F=48,4$ kN, $\sigma = 9,68$ kN/m. W przypadku materiału gumy z warstw zewnętrznych (PR) średnie wartości parametrów

otrzymanych w czasie badań laboratoryjnych to: $\varepsilon = 600\%$, $F = 77,17$ N oraz $\sigma = 15,43$ kN/m. Producent dla tego materiału podaje natomiast następujące wartości średnie: $\varepsilon = 547\%$, $F = 79,4$ N oraz $\sigma = 15,88$ kN/m. Przeprowadzone obliczenia i analizy otrzymanych wyników badań laboratoryjnych pozwalają uznać, że przygotowane dane do modelowania numerycznego połączenia klejowego taśmy przenośnikowej (przebiegi krzywych rozciągania poszczególnych materiałów) są dokładne, co umożliwi opracowanie adekwatnego modelu numerycznego w ujęciu metody elementów skończonych.

4.2.2. Symulacja numeryczna stanu naprężenia i odkształcenia w obszarze złącza

W celu przeprowadzenia analizy wytrzymałości poprzez określenie stanu naprężenia i odkształcenia w obszarze analizowanego połączenia klejowego odcinków taśmy przenośnikowej, opracowano dwa modele złącza oraz przeprowadzono ich analizę numeryczną stosownie do założonego celu z wykorzystaniem danych materiałowych pozyskanych w trakcie prób wytrzymałościowych.

Na etapie modelowania numerycznego analizowano naprężenia zredukowane, wywołujące w jednoosiowym stanie naprężenia (rozciąganie złącza taśmy) takie samo wyciężenie, jak reprezentowany przez nie przypadek złożonego stanu naprężenia. Naprężenia zredukowane były w analizowanym przypadku określane na podstawie hipotezy Hubera-Misesa-Hencky'ego (H-M-H) [114, 189]:

$$\sigma_{zred} = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (4.1)$$

gdzie: σ_1 , σ_2 , σ_3 - składowe główne tensora naprężenia.

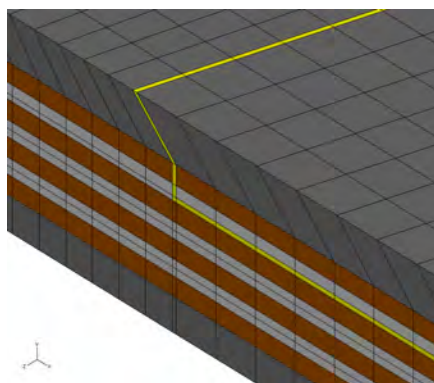
4.2.2.1. Zakres obliczeń i charakterystyka numeryczna połączenia klejowego

Metoda elementów skończonych, należąca do grupy najbardziej popularnych metod wspomagania komputerowego, służących rozwiązywaniu zagadnień mechaniki, polega na zastąpieniu ciągłego modelu analizowanego układu mechanicznego jego modelem dyskretnym (rys. 4.11, 4.12), który w opisie matematycznym przyjmuje postać układu równań algebraicznych [16].



Rys. 4.11 – Widok ogólny fragmentu przestrzennego modelu MES złącza klejowego taśmy przenośnikowej

Jak wynika z prowadzonych wcześniej rozważań - w przypadku materiałów hipersprężystych arbitralny często dobór ich modeli jest z reguły pierwszym, podstawowym błędem, skutkującym niedokładnością wyników modelowania numerycznego. Dysponując danymi pochodzącymi z badań wytrzymałościowych, zgodnie z przyjętą metodyką postępowania - na drodze eksperymentalnej sprawdzono, który z dostępnych modeli teoretycznych najlepiej odwzorowuje zachowanie się każdego z modelowanych materiałów gumowych.

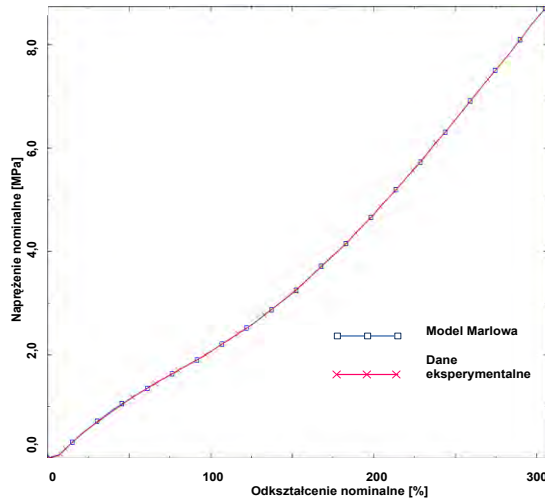


Rys. 4.12 – Fragment przykładowego modelu przestrzennego złącza klejowego

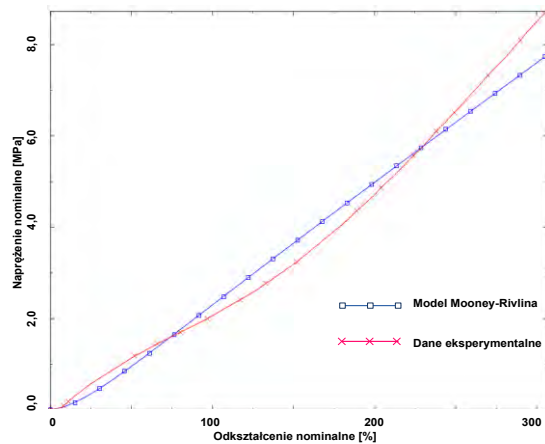
W tym też celu oddzielnie dla każdego z materiałów analizowanego złącza klejowego przetestowano dostępne modele opracowane dla materiałów

hipersprężystych. Wynik analizy pozwala na ocenę ich stopnia zgodności z danymi eksperymentalnymi. Analizę zrealizowano za pomocą oceny zachowania się w danym przypadku materiału hipersprężystego w oparciu o tworzone krzywe reakcji przy wykorzystaniu wybranych potencjałów energii odkształcenia.

a)



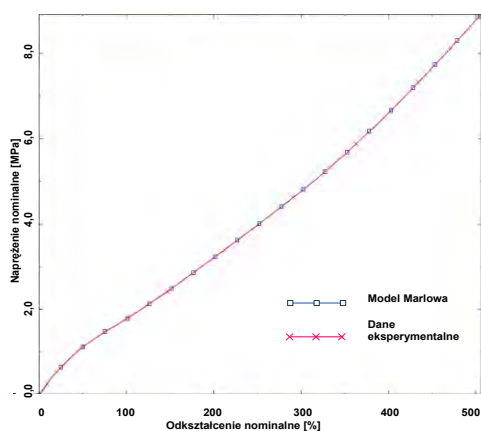
b)



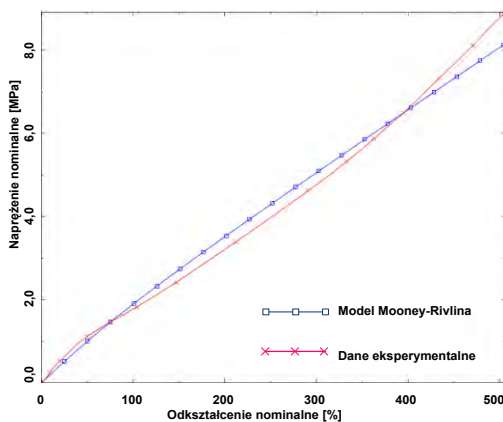
Rys. 4.13 – Przykładowe odwzorowanie właściwości wytrzymałościowych gumy okładkowej przy zastosowaniu modelu Marlowa (a) oraz (b) - modelu Mooney-Rivlina

Jak wynika z przeprowadzonej w oparciu o dane z testów wytrzymałościowych analizy poszczególnych modeli materiałów hipersprężystych (2.2-2.13) dla gum wchodzących w skład złącza taśmy przenośnikowej oraz oceny poziomu błędu aproksymacji, najlepsze odwzorowanie i stabilność modelu w badanym przypadku, zarówno dla materiału gumy zewnętrznej (protektorowej), jak i gumy wewnętrznej (rdzeniowej) otrzymano stosując model Marlowa (rys. 4.13 i rys. 4.14), natomiast dla kleju kauczukowego najlepsze wyniki uzyskano stosując model Mooney-Rivlina.

a)



b)



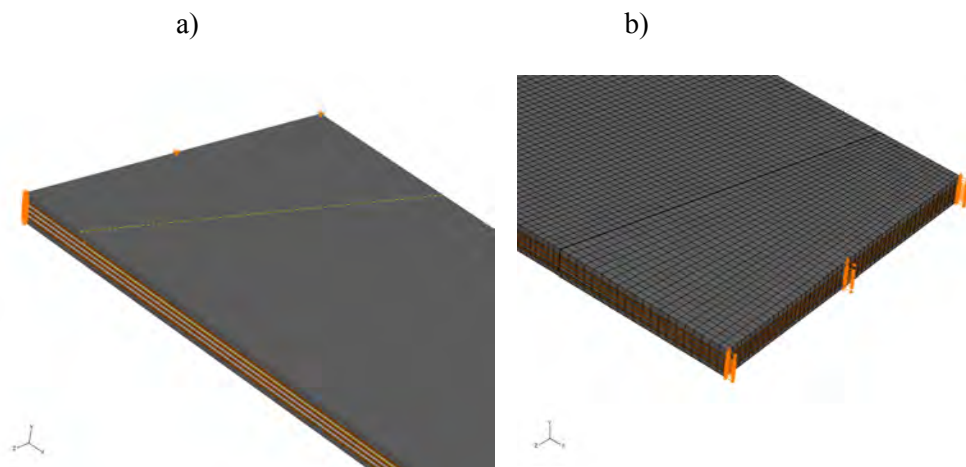
Rys. 4.14 – Przykładowe odwzorowanie właściwości wytrzymałościowych gumy rdzeniowej przy zastosowaniu modelu Marlowa (a) oraz (b) - modelu Mooney-Rivlina

Takie też charakterystyki modeli materiałów wchodzących w skład analizowanego złącza zostały wybrane na etapie modelowania numerycznego. Dodatkowo jednak, dla porównania otrzymanych wyników w trakcie modelowania złącza klejowego taśmy przenośnikowej gumowo-tkaninowej z wykorzystaniem metody elementów skończonych przeprowadzono również analizę modelu, w którym warstwę klejową scharakteryzowano, jako materiał sprężysto-plastyczny.

Do obliczeń numerycznych zastosowano zatem zgodnie z wynikami opisanej wcześniej analizy sprężysto-plastyczne oraz nieliniowo-sprężyste (hipersprężyste) modele materiałowe ze względu na nieliniowe właściwości materiałów występujących w analizowanym połączeniu. W przypadku tkaniny zdecydowano się na zastosowanie liniowo-sprężystej charakterystyki materiałowej.

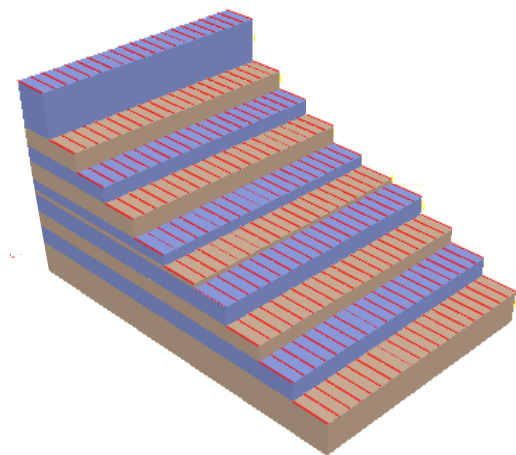
Prowadzone obliczenia miały charakter pełnego nieliniowego zagadnienia uwzględniającego zarówno nieliniowość fizyczną, jak i geometryczną. Zagadnienie geometrycznie nieliniowe zostało przeanalizowane dzięki zastosowaniu przyrostowo-iteracyjnych technik obliczeniowych opartych na metodzie Newtona-Raphsona. Metoda ta pozwala na bardzo dokładne uwzględnienie dużych wartości odkształceń, jakie są typowe dla materiałów gumowych, ponieważ opiera się ona na równaniach uwzględniających nieliniowe związki pomiędzy przemieszczeniami i odkształceniami. Nieliniowość fizyczna (materiałowa) uwzględnia z kolei nieliniowe związki pomiędzy naprężeniami i odkształceniami. W ten sposób możliwe było uwzględnienie w analizie numerycznej dwóch rodzajów nieliniowości. Narzędziem numerycznym umożliwiającym prowadzenie analizy MES w zakresie fizycznie i geometrycznie nieliniowym był wykorzystany do obliczeń program ABAQUS/Standard.

Do obliczeń MES zastosowano przestrzenny model numeryczny połączenia klejowego, oparty na strukturalnej siatce objętościowych elementów skończonych typu heksagonalnego, posiadających po trzy translacyjne stopnie swobody w każdym węźle. W przypadku gumy zastosowane zostały ośmiowęzłowe hybrydowe elementy heksagonalne, umożliwiające zamodelowanie materiału hipersprężystego, charakteryzującego się dużymi odkształceniami i bardzo małą ściśliwością (lub wręcz nieściśliwością). Warunki brzegowe zdefiniowano poprzez zablokowanie translacyjnych stopni swobody węzłów znajdujących się na lewej czołowej powierzchni złącza (rys. 4.15a) oraz pozostawienie możliwości przemieszczeń czołowej powierzchni prawej części złącza tylko na kierunku przyłożenia obciążenia (rys. 4.15b). Obciążenie realizowano poprzez przemieszczenie swobodnego końca taśmy na kierunku osi x , o wartość stanowiącą średnie jej wydłużenie w chwili przyłożenia krytycznej wartości obciążenia w badaniach eksperymentalnych.



Rys. 4.15 – Fragment modelu przestrzennego złącza klejowego: podział na elementy skończone oraz warunki brzegowe: a) zablokowane translacyjne stopnie swobody węzłów lewej części złącza, b) przyłożenie obciążenia w prawej części złącza (widok z siatką elementów skończonych)

Taki sposób modelowania jest czasochłonny i wymaga dużej mocy obliczeniowej. Dlatego też dodatkowo opracowano model złącza bazując na technice modelowania struktur wielowarstwowych (rys. 4.16), dla przypadku połączenia odcinków wieloprzekładkowej taśmy przenośnikowej.



Rys. 4.16 - Model złącza bazujący na technice modelowania struktur wielowarstwowych - fragment struktury geometrycznej modelu

Metoda ta opiera się na tak zwanych w Abaqus opcjach *layup* oraz *ply*, co pozwala na jednowarstwowe odwzorowanie struktury wielowarstwowej za pomocą elementów powłokowych (typu *shell*, *membrane* oraz *surface*). Zaletą takiego sposobu modelowania struktur wielowarstwowych jest znaczne ograniczenie rozmiaru zadania obliczeniowego, dzięki zamodelowaniu wielu warstw konstrukcji w ramach jednego elementu skończonego, na przykład typu *shell*.

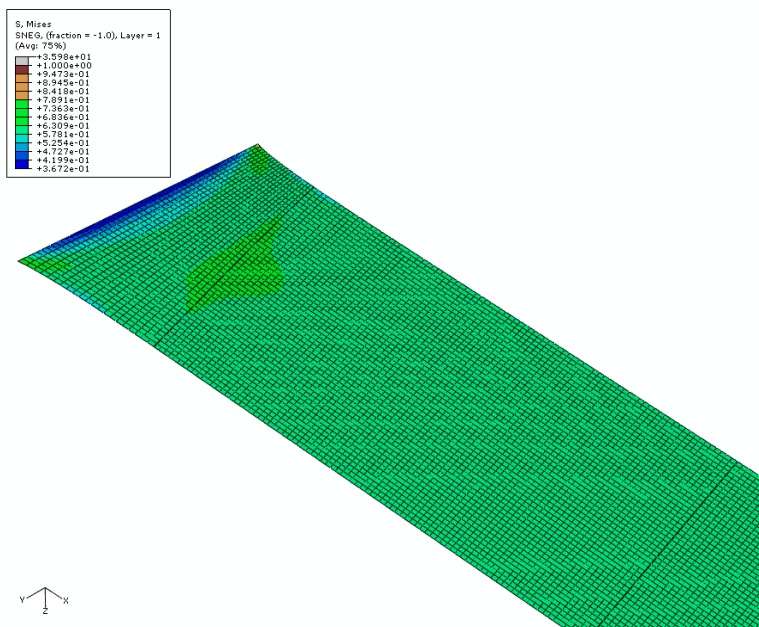
W przypadku opracowania modelu, który dobrze odwzorowuje warunki rzeczywiste i został poprawnie zweryfikowany, w krótkim czasie możliwe jest przeprowadzenie analizy szeregu alternatywnych modeli, na przykład o zmienionych parametrach geometrycznych, w celu optymalizacji konstrukcji pod względem geometryczno-wytrzymałościowym.

4.2.2.2. Modelowanie numeryczne złącza taśmy czteroprzekładowej

W spoinie klejowej występuje z reguły złożony stan naprężenia, co utrudnia odpowiednie wyznaczenie naprężeń zastępczych zgodnie z jedną ze znanych hipotez wyteżenia materiałów. Jak podaje Godzimirski i inni [71] oraz producenci klejów do różnych zastosowań [121] – cechą charakterystyczną zakładkowych połączeń klejowych obciążanych na ścinanie jest to, że ich wytrzymałość nie jest proporcjonalna do długości zakładki, a tym samym i do pola powierzchni spoiny. Powoduje to w konsekwencji fakt, że analiza wytrzymałości takich połączeń w oparciu o średnie naprężenia styczne jest nieprecyzyjna. Dlatego też sugeruje się w takim przypadku określanie wytrzymałości połączenia za pomocą naprężeń normalnych lub zredukowanych występujących w klejonych elementach w chwili niszczenia spoiny.

W analizowanym zadaniu oceny rozkładu naprężeń w złączu taśmy przenośnikowej czteroprzekładowej w pierwszej kolejności dokonano oceny wyników modelowania dla modelu zbudowanego w oparciu o elementy powłokowe. Zgodnie z przewidywaniami obliczenia numeryczne realizowane zostały w krótkim czasie, co było między innymi efektem małej liczby elementów siatki (15912) oraz odpowiadającej im liczby równań. Weryfikacja modelu spowodowała jednak konieczność jego odrzucenia, ponieważ obliczone maksymalne naprężenia zredukowane wyniosły 35,9 MPa, co jest wartością nierealnie niską (rys. 4.17). Przyczyną takiego wyniku był brak możliwości poprawnego odwzorowania modelowanego obiektu, ponieważ używane standardowo w takim przypadku elementy powłokowe

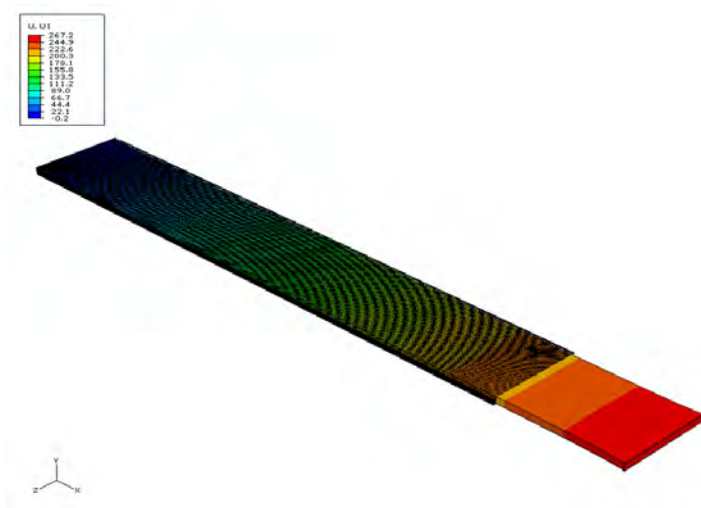
nie uwzględniają właściwości materiałów charakteryzujących się znacznymi odkształceniami (materiały gumowe). Ponadto metoda ta nie pozwala na modelowanie konstrukcji zbrojonych, a więc na przykład taśm przenośnikowych z linkami stalowymi.



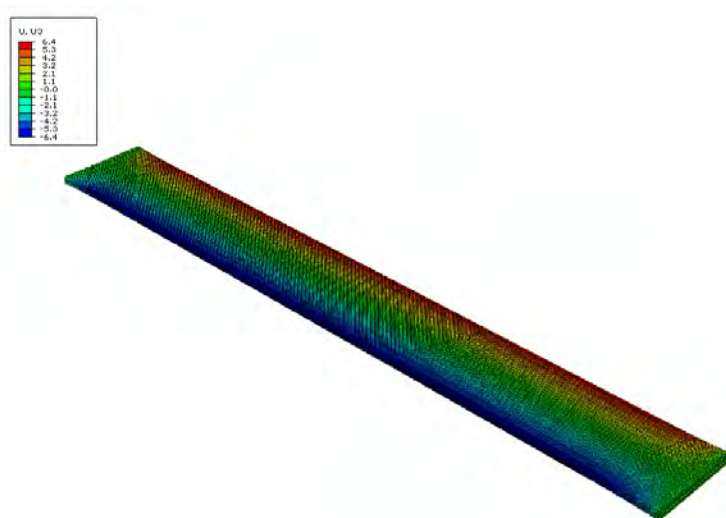
Rys. 4.17 – Rozkład naprężeń w modelu złącza klejowego taśmy przenośnikowej bazującym na technice modelowania struktur wielowarstwowych (model zweryfikowany negatywnie)

W analizowanym drugim, bardziej rozbudowanym przypadku modelu przestrzennego złącza klejowego taśmy przenośnikowej przeprowadzone obliczenia pozwalają określić stan odkształcenia i naprężenia w poszczególnych elementach analizowanego połączenia klejowego w chwili jego maksymalnego wydłużenia odpowiadającego obciążeniu niszczącemu (rys. 4.18a). Możliwa była również analiza przewężenia próbki w chwili największego obciążenia (rys. 4.18b). W przeprowadzonej analizie poddano ocenie wartości naprężenia zredukowanego wyznaczonego według hipotezy wytrzymałościowej Hubera-Misesa-Hencky'ego w poszczególnych elementach konstrukcji, oddzielnie analizując je dla całego złącza, jak i każdej z warstw. Taki sposób analizy wynikał z faktu, że w połączeniach zakładkowych zwyczajowo występują złożone stany naprężenia z naprężeniami normalnymi przewyższającymi wartości naprężeń stycznych.

a)



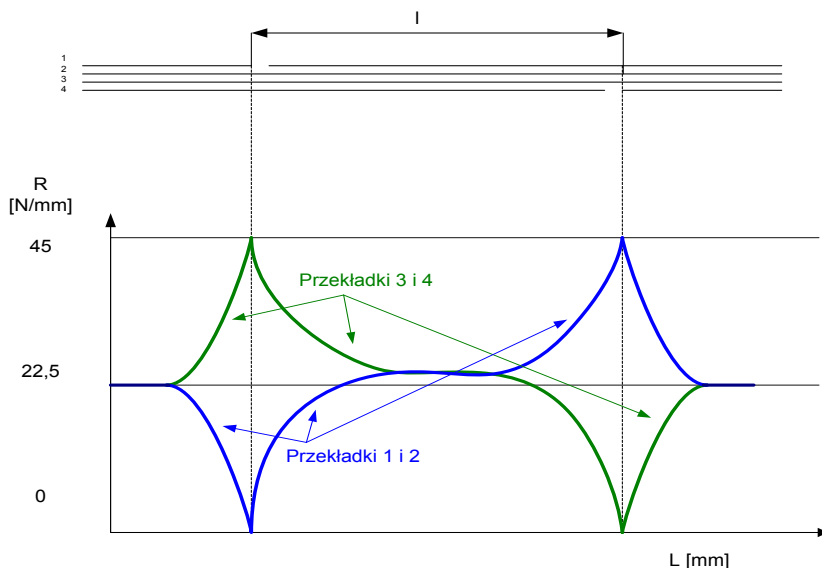
b)



Rys. 4.18 – Wydłużenie próbki złącza (a) oraz jej przewężenie (b) w chwili maksymalnego obciążenia

W związku z powyższym konieczne było przeprowadzenie analizy za pomocą oceny naprężeń zredukowanych. Przeprowadzona w ten sposób zgodnie z założeniami analiza pełnego zagadnienia nieliniowego

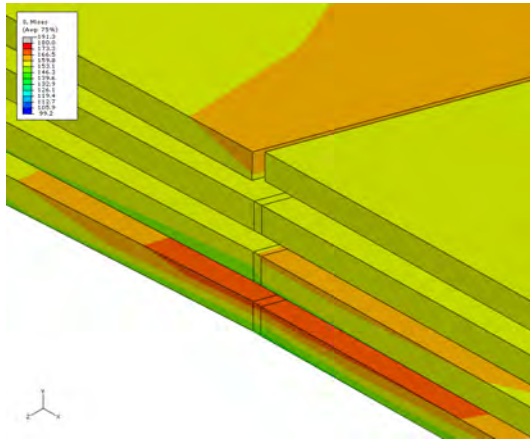
uwzględniającego zarówno nieliniowość fizyczną, jak i nieliniowość geometryczną, skutkowałą długim czasem obliczeń każdego modelu numerycznego. W wyniku przyjętej metody dyskretyzacji, model połączenia zbudowany był w analizowanym przypadku ze 190944 elementów skończonych oraz 339027 węzłów, stanowiąc zaawansowane i rozbudowane zagadnienie obliczeniowe składające się z 762073 równań.



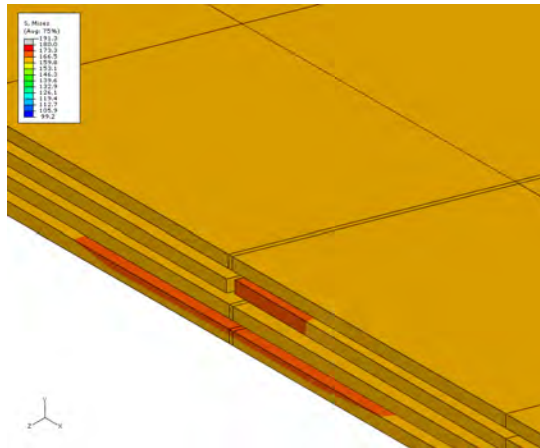
Rys. 4.19 – Schemat rozkładu naprężeń rozciągających w przekładkach połączenia taśmowego [29]

W pracy Błażeja i innych [29], dotyczącej wpływu niektórych parametrów na wytrzymałość złączy taśm przENOŚNIKOWYCH stwierdzono, że analizowane naprężenia w rzeczywistości znacznie różnią się od wartości obliczonych na podstawie zależności analitycznych, a z wyników prowadzonych prac analitycznych można wywnioskować, że naprężenia rozciągające w przekładkach tkaninowych mają rozkład zbliżony do przebiegów zaprezentowanych na rysunku 4.19. Wyniki realizowanego w pracy modelowania MES połączenia klejowego taśmy czteroprzekładkowej były zgodne z opisywanymi przebiegami. W przypadku pierwszego stopnia analizowanego złącza otrzymano wyniki świadczące o wzroście wartości naprężeń zredukowanych w trzeciej oraz szczególnie czwartej przekładce. Wzrost nastąpił z poziomu ok. 159 MPa do 190 MPa (rys. 4.20a).

a)



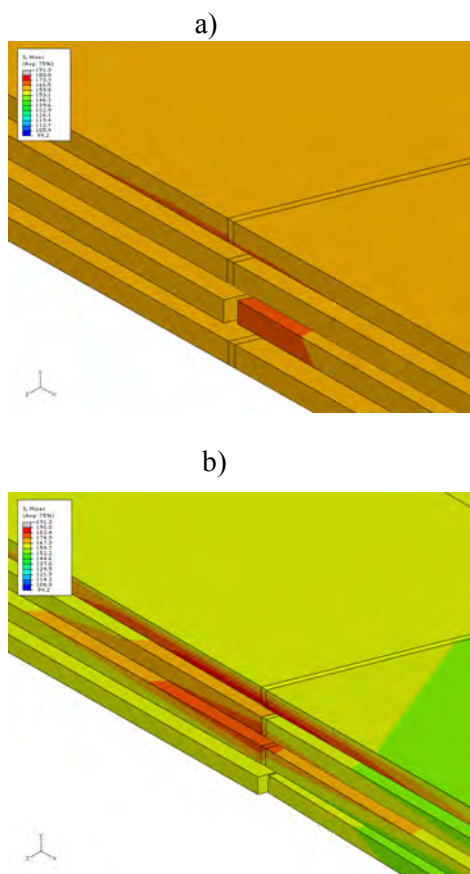
b)



Rys. 4.20 – Rozkład naprężeń zredukowanych w warstwach tkaniny przekładkowej: a) początek pierwszego stopnia połączenia, b) styk pierwszego i drugiego stopnia połączenia

Podobnie jest w przypadku drugiego stopnia złącza klejowego (rys. 4.20b), gdzie zgodnie z przebiegiem scharakteryzowanym na rysunku 4.19 we wszystkich zakładkach występuje mniej więcej zbliżony rozkład naprężeń, o wartościach większych niż w obszarze poza złączeniem. W tym przypadku średnie wartości naprężeń zredukowanych w obszarze największej ich

koncentracji wynoszą około 195 MPa i są większe od średnich wartości w obszarze poza złączem o około 75 MPa. Są one też znacznie niższe od wartości wytrzymałości tkaniny na zrywanie, którą w trakcie badań laboratoryjnych określono, jako wynoszącą średnio 270 MPa. Największe wartości naprężeń zredukowanych występują w tym przypadku szczególnie w warstwie czwartej przekładki i koncentrują się w obszarze pod przeciętą przekładką drugą. Stopień trzeciego złącza (rys. 4.21a i rys. 4.21b) charakteryzuje się również rozkładem naprężeń zgodnym z analizowanym przebiegiem. Fakt ten jest jedną z podstaw do zweryfikowania poprawności opracowanego modelu numerycznego.

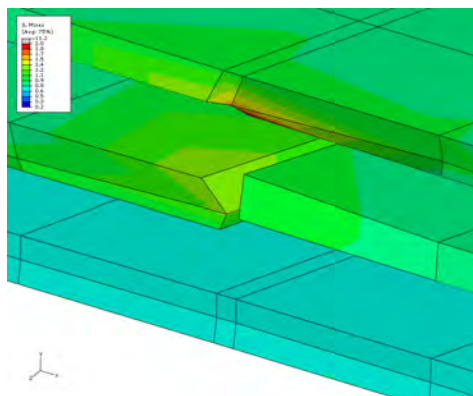


Rys. 4.21 – Rozkład naprężeń zredukowanych w warstwach tkaniny przekładkowej: a) styk drugiego i trzeciego stopnia połączenia, b) koniec trzeciego stopnia połączenia

Wartości naprężeń zredukowanych w przekładkach w obszarze styku trzeciego i czwartego stopnia złącza są identyczne z otrzymanymi w wyniku obliczeń numerycznych MES wartościami dla pierwszych dwóch stopni połączenia. Podobna jest również różnica pomiędzy maksymalnymi naprężeniami w przekładce nad przecięciem i naprężeniami poza obszarem złącza.

Analizując wyniki obliczeń numerycznych MES mamy możliwość wskazania miejsc konstrukcji, charakteryzujących się znaczną koncentracją naprężeń, co w konsekwencji może doprowadzić do zniszczenia połączenia. Posiadając odpowiednie doświadczenie w analizie połączeń klejowych jesteśmy w stanie prognozować miejsca występowania silnych gradientów naprężenia, czego skutkiem jest odpowiednie zagęszczenie w tych miejscach elementów siatki, co w konsekwencji jest gwarancją otrzymania dokładniejszych rozkładów naprężeń. Z dotychczasowych prób modelowania złączy wieloprzekładkowych taśm przenośnikowych [27] wiemy, że podobnie, jak w wynikach modelowanego przypadku, miejscem występowania największych naprężeń są styki na poszczególnych stopniach połączeń, a najmniejsze ich wartości rejestrujemy w środkowych częściach każdego stopnia.

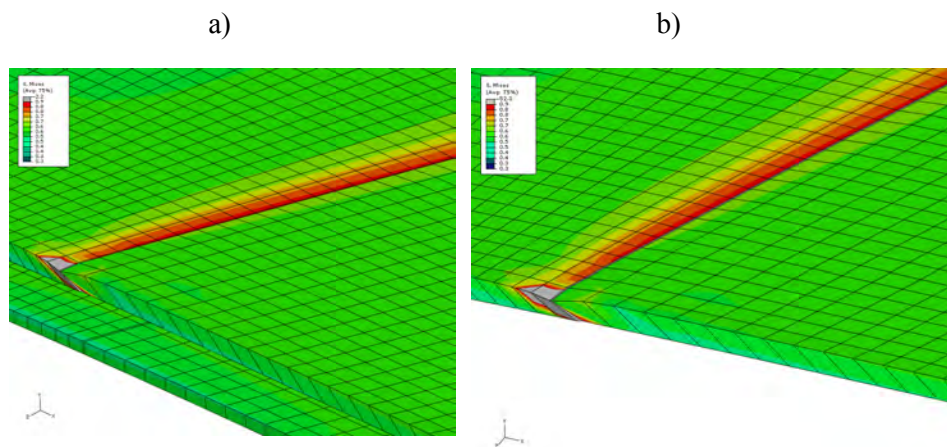
Ogólnie znanym jest fakt, że uszkodzenia elementów rdzenia taśmy przenośnikowej mają istotny, negatywny wpływ na jej wytrzymałość przy wszelkiego rodzaju obciążeniach. W przypadku przecięcia jednej z przekładek tkaninowych taśmy wieloprzekładkowej następuje przesunięcie obciążenia przenoszonego przez przeciętą przekładkę na pozostałe (rys. 4.20, rys. 4.21). Stan taki powoduje zwiększenie nierównomierności obciążenia przekładek, obniżając w ten sposób sumaryczną wartość obciążenia, przy których dochodzi do zerwania taśmy [209].



Rys. 4.22 – Przykładowy rozkład naprężeń zredukowanych w warstwach gumy międzyprzekładkowej (przecięta warstwa środkowa)

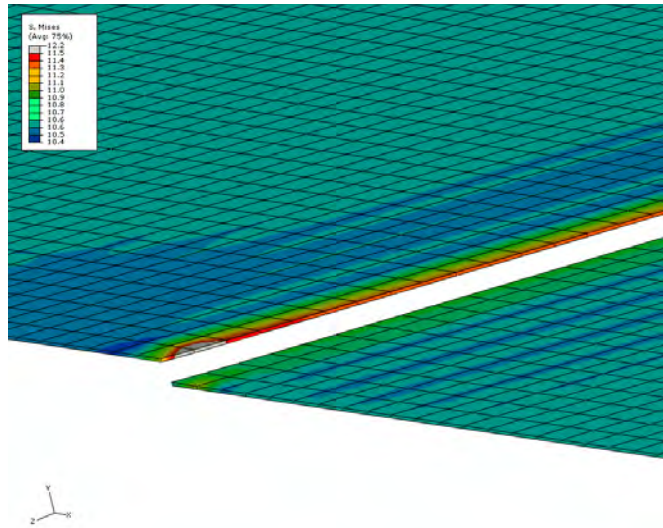
Zwiększeniu ulega również obciążenie pozostałych warstw wchodzących w skład złącza, mimo że to przekładki tkaninowe przenoszą największe jego wartości. W przypadku warstw gumy wewnętrznej (międzyprzekładkowej), analizując wyniki modelowania numerycznego również obserwujemy wzrost wartości naprężeń i ich koncentrację w warstwie leżącej nad miejscem przecięcia (rys. 4.22). Wzrost ten jest znaczący, ponieważ wartości naprężeń zredukowanych w warstwie gumy wewnętrznej rosną średnio z 0,5 MPa do 2 MPa. Wartości te są jednak znacznie niższe od maksymalnej wytrzymałości tego materiału na zrywanie, która w trakcie badań laboratoryjnych osiągała wartość 12,45 MPa.

Analogiczna sytuacja ma miejsce w przypadku gumy z warstw zewnętrznych (rys. 4.23a), gdzie zarejestrowano podobny wzrost wartości naprężeń zredukowanych, przy czym w tym miejscu znacznie bardziej zauważalna jest koncentracja naprężeń w części zewnętrznej okładki nośnej (2,2 MPa wobec maksymalnych naprężeń zrywających wynoszących dla tego materiału 22 MPa).



Rys. 4.23 – Przykładowy rozkład naprężeń zredukowanych w warstwach gumy zewnętrznej: a) widok obydwu warstw gumy protektorowej, b) widok warstwy nośnej wraz z klejem

Na rysunku 4.23b przedstawiono rozkład naprężeń w warstwie nośnej wizualizowanej łącznie z klejem. Zauważalny jest tu wzrost wartości naprężeń maksymalnych do poziomu 52,3 MPa występującego w warstwie spoiny, z koncentracją w rejonie krawędzi złącza. Można na tej podstawie wnioskować, że czynnikiem decydującym o wytrzymałości analizowanego połączenia są wartości naprężeń na powierzchni styku kleju i łączonych elementów, co potwierdza między innymi przykładowy rozkład naprężeń w warstwie kleju (rys. 4.24), prezentujący widoczną koncentrację naprężeń na krawędzi warstwy spoiny.

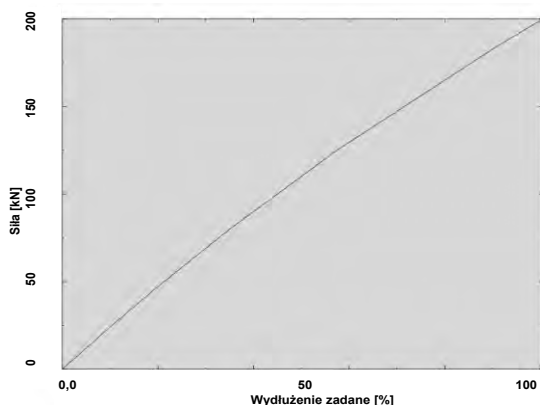


Rys. 4.24 – Przykładowy rozkład naprężeń zredukowanych w spoinie klejowej

Jednym z podstawowych celów prowadzonej analizy numerycznej było opracowanie wiarygodnego modelu połączenia oraz określenie rozkładów naprężeń przy zadanym wydłużeniu połączenia, odpowiadającym wartości wydłużenia w chwili zerwania. Z przedstawionego na rysunku 4.25 wykresu reakcji możemy odczytać, że przy zadanym wydłużeniu wynoszącym 22%, złącze obciążone było siłą wynoszącą 199,14 kN. Wartość ta odpowiada siłom zrywającym rzeczywiste próbki złącza zarejestrowanym podczas prób wytrzymałościowych, w trakcie, których następowało zniszczenie złącza przy jego obciążeniu siłami z zakresu 152-203 kN, przy odpowiadającym im wydłużeniu w chwili zerwania wynoszącym od 19,5% do 22,6% [140-142, 144]. Fakt ten stanowi kolejne kryterium weryfikacji zgodności opracowanego modelu numerycznego z warunkami rzeczywistymi.

Poza opracowaniem modelu numerycznego połączenia klejowego odcinków taśmy przenośnikowej oraz analizą występującego w jego obszarze rozkładu naprężeń, przeanalizowano również wpływ zmiany charakterystyki materiału spoiny na wyniki modelowania. Analizując połączenia klejowe tego typu można, bowiem zauważyć, że ani literatura, ani producenci klejów, ani też technolodzy wykonujący takie połączenia nie analizują z reguły i nie upubliczniają informacji na temat właściwości i cech klejów, ograniczając się jedynie do oceny finalnych cech wytrzymałościowych wykonanego połączenia. Dlatego też nieodzownym staje się prognozowanie, w jaki sposób warstwa kleju lub też całe połączenie klejowe będzie zachowywać się w określonych

warunkach przy zadanym, dowolnym obciążeniu. W ten sposób mamy największą możliwość wpływania na wytrzymałość i trwałość połączenia klejowego wykonanego z zastosowaniem określonego kleju. Do tego niezbędne jest jednak przyjęcie odpowiedniej charakterystyki analizowanego w tym przypadku kleju kauczukowego. Z reguły, jak podaje literatura, materiał spoiny jest w takim przypadku modelowany jako sprężysto-plastyczny. Producenci kleju oraz technolodzy wykonujący połączenia na jego bazie sugerują z kolei analizowanie tego materiału, jako podobnego do wyrobów kauczukowych, a więc modelowanego, jako materiał hipersprężysty. Przeanalizowane w ramach prowadzonych badań obydwie modele złącza taśmowego z charakterystyką kleju, jako materiału sprężysto-plastycznego i materiału typu hipersprężystego nie wykazywały zasadniczych różnic w rozkładach naprężeń. Również wartość siły obciążającej złącze w chwili zadanego, maksymalnego wydłużenia była w obydwu przypadkach niemal identyczna ($F=199,14$ kN dla przypadku kleju, jako materiału sprężysto-plastycznego i $F=199,43$ kN dla drugiego analizowanego typu charakterystyki materiału spoiny).

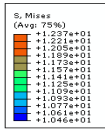


Rys. 4.25 – Wykres reakcji – siła obciążająca złącze przy jego rozciąganiu do poziomu 100% wydłużenia zadanego

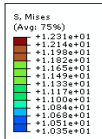
Wytrzymałość zakładkowego połączenia klejowego obciążonego na ścinanie, jak ma to miejsce w przypadku połączeń odcinków taśmy przenośnikowej, zależy nie tylko od właściwości mechanicznych kleju, ale również i od wymiarów złącza [71, 75, 197]. Istotne w tym aspekcie parametry mechaniczne kleju to charakteryzująca go wartość naprężeń niszczących oraz moduł sprężystości postaciowej. Parametry geometryczne złącza bezpośrednio wpływające na jego wytrzymałość to z kolei szerokość, długość i grubość spoiny klejowej. Istotna jest też grubość klejonych elementów

oraz charakteryzujący je moduł sprężystości podłużnej. Cechy geometryczne połączenia klejowego odcinków taśmy przenośnikowej zatem to długość zakładki oraz grubość warstwy klejowej. Optymalizacja cech geometrycznych zakładki nie oznacza jednak jej dowolnego przedłużania.

a)



b)



Rys. 4.26 – Rozkład naprężeń w warstwie kleju o grubości a) 0,2 mm, b) 0,6 mm

Zwiększenie długości zakładki zmniejsza średnią wartość naprężenia ścinającego, powodując jednocześnie nieproporcjonalnie mały wzrost obciążenia niszczącego [121]. Tego typu analizy optymalizacyjne możliwe są również do przeprowadzenia w oparciu o opracowany model złącza. W analizowanym zagadnieniu dokonano z tego też względu przykładowej oceny wpływu zmiany grubości warstwy kleju na stan naprężeń w obszarze złącza. W analizowanym podstawowym modelu grubość warstwy kleju wynosiła 0,4 mm. Dla przeprowadzenia analizy porównawczej wykonano dodatkowe dwa modele, w których kosztem materiału gumy zaprojektowano spoiny o grubości warstwy kleju wynoszącej 0,2 mm i 0,6 mm (rys. 4.26a i rys. 4.26b), co w warunkach przemysłowych mogłoby odpowiadać sytuacji niestarannego wykonania połączenia.

W obydwu tak analizowanych przypadkach nie zarejestrowano jednak istotnych różnic w rozkładzie i wartościach naprężeń zredukowanych. Również obliczone z wykresu reakcji wartości siły obciążającej złącze przy zadanym wydłużeniu były zbliżone i wynosiły odpowiednio: $F=198,84$ kN dla spoiny o grubości 0,2 mm, $F=199,14$ kN dla spoiny 0,4 mm oraz $F=199,43$ kN dla warstwy kleju o grubości 0,6 mm

4.2.3. Podsumowanie analizy wyników modelowania numerycznego

Łączenie elementów klejem ma dużą przewagę nad metodami mechanicznymi. Klej sprawia bowiem, że obciążenia nie koncentrują się w miejscach największego naprężenia, lecz siły statyczne i dynamiczne rozkładają się równomiernie na całej powierzchni. Wytrzymałość połączenia klejowego powinna być zbliżona do wytrzymałości materiału klejonego, co oznacza, że spoina pod obciążeniem nie powinna pękać wcześniej w błonie klejowej (warstwa kohezyjna) lub w warstwie granicznej między klejem i elementem klejonym (warstwa adhezyjna) niż sam element klejony [51, 71]. W przypadku połączeń odcinków taśmy przenośnikowej warunek ten, co pokazują również wyniki opisanych badań laboratoryjnych, nie jest spełniony. Cechą dobrego połączenia klejowego jest równy rozkład naprężeń. W celu uzyskania dostatecznie dużej wytrzymałości i trwałości złącza klejowego najistotniejsze jest bowiem zapewnienie w nim wystąpienia możliwie najbardziej jednolitego rozkładu naprężeń. I ten warunek w analizowanym przypadku nie jest spełniony, z racji występowania na krawędziach złącza znacznych koncentracji naprężeń, co jest z kolei typową cechą zakładkowych połączeń klejowych. Konstruktorzy i technolodzy powinni zatem posiadać

dokładną i precyzyjną wiedzę, w jaki sposób rozkładają się naprężenia w obciążonym złączu analizowanego przypadku połączenia. Pomocne w tym mogą być wyniki modelowania numerycznego wg opisanego w niniejszej pracy sposobu postępowania.

W przypadku połączenia klejowego odcinków taśmy przenośnikowej występują głównie obciążenia ścinające, a w niektórych, nielicznych przypadkach również obciążenia oddzierające. Przy przejściu taśmy ze złączem przez bębny i inne elementy konstrukcji nośnej przenośnika dochodzi ponadto do chwilowego wystąpienia nierównomiernego rozkładu naprężenia ścinającego będącego efektem działania sił powodujących moment gnący, co przyczynia się do wzrostu naprężenia rozciągającego na krańcach spoiny. W przypadku konstrukcji połączenia klejowego odcinków taśmy przenośnikowej przeciwdziała się tego typu zjawiskom poprzez na przykład zastosowanie ukosowania.

Złącze klejowe taśmy przenośnikowej składa się z czterech materiałów o różnych właściwościach. Nierównomierne odkształcenie tych elementów złącza oraz ich wzajemne przesunięcie są przyczynami powstawania odkształceń postaciowych, w tym naprężeń stycznych, mogących powodować przekroczenie wartości naprężeń niszczących, a w konsekwencji zniszczenie połączenia.

Ogólnie wiadomym jest, że wytrzymałość połączeń klejowych zależy od grubości spoiny oraz że wartość niszczących naprężeń spoiny jest również funkcją grubości. Grubsza spoina lepiej przenosi naprężenia ścinające, bowiem naprężenie rozkłada się w niej na większej powierzchni, zmniejszając tym samym naprężenia jednostkowe w kleju, co powoduje redukcję koncentracji naprężeń. Podobne zjawisko ma miejsce w przypadku zastosowania kleju o niższym współczynniku sprężystości [71, 121]. Optymalizacja wartości tych dwóch parametrów pozwala na uzyskanie złącza o najlepszych cechach w ujęciu wytrzymałościowym. Analiza MES dla tego zagadnienia jest niezwykle korzystna z racji, że wyniki badań eksperymentalnych charakteryzują się w tym przypadku znaczną rozbieżnością w stosunku do wyników rozważań o charakterze analitycznym. Dobierając klej i jego parametry do konkretnego zastosowania należy w pierwszej kolejności brać pod uwagę wielkość działających sił oraz jego zdolność do przenoszenia maksymalnych obciążeń, jak i szczególnie istotną w przypadku złączy taśm przenośnikowych odporność na zmęczenie lub naprężenia cykliczne. Naprężenia cykliczne, szczególnie te o długotrwałym charakterze mają większy negatywny wpływ na trwałość złącza, niż naprężenia stałe, nawet o znacznej wartości. Największy wpływ na wytrzymałość zmęczeniową połączenia ma jednak poziom naprężeń w spoinie, a szczególnie nierównomierność jego rozkładu i występowanie miejsc koncentracji naprężeń.

Z przeprowadzonego modelowania numerycznego analizowanego w pracy złącza klejowego czteroprzekładowej tkaninowo-gumowej taśmy przenośnikowej można, zatem w uogólnieniu wywnioskować, że:

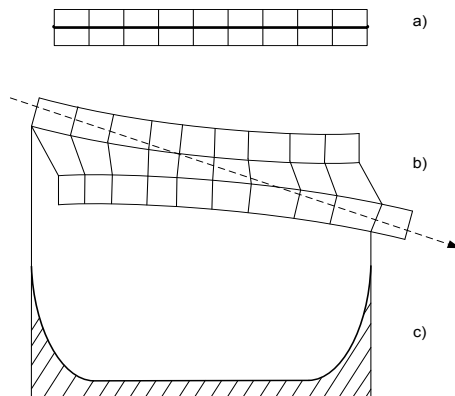
1. Przeprowadzona analiza rozkładu naprężeń i odkształceń z zastosowaniem różnych modeli połączenia klejowego odcinków taśmy przenośnikowej, potwierdza wysoką w tym przypadku efektywność modelowania numerycznego z zastosowaniem Metody Elementów Skończonych. W związku z tym, że żadna z metod analitycznych nie umożliwia dostatecznie dokładnego określenia rozkładów naprężeń w spoinach klejowych połączeń obciążonych na ścinanie, dlatego też MES powinna być szerzej stosowana do obliczania i analizy wytrzymałości tego typu połączeń.
2. Dzięki analizie wyników odpowiednio zweryfikowanego modelu połączenia możliwa jest nie tylko analiza wytrzymałościowa tego typu konstrukcji, ale również ocena wpływu zmian geometrii połączenia i właściwości materiałów złącza na jego wytrzymałość. Mając na uwadze fakt, że taśma przenośnikowa konstruowana i dobierana jest tak, aby mogła przenosić jak największe siły rozciągające występujące w różnych stanach pracy przenośnika, skuteczna analiza takich przypadków możliwa jest z wykorzystaniem opracowanego modelu MES.
3. Istotnym warunkiem uzyskania zgodności otrzymanych wyników modelowania z warunkami rzeczywistym jest nie tylko poprawne zamodelowanie konstrukcji z punktu widzenia jej dyskretyzacji, czy też doboru warunków brzegowych, ale równie istotne jest posiadanie odpowiednich danych materiałowych charakteryzujących właściwości wytrzymałościowe modelowanych materiałów, powiązane z poprawnym doбором ich modeli matematycznych. Do tego celu niezbędne jest przeprowadzenie prób wytrzymałościowych wg opisanej w pracy metodyki pozyskiwania danych laboratoryjnych i ich modelowania.
4. Możliwa jest modyfikacja klejów tak, aby uzyskać odpowiednie ich właściwości, na przykład charakterystyczne dla klejów znajdujących się w stanie pośrednim pomiędzy stanem szklistym i wysokoelastycznym, zamiast typowo wysokoelastycznym. Otrzymana w trakcie badań laboratoryjnych krzywa rozciągania próbek z kleju, pozwoliła zakwalifikować ten materiał do grupy klejów będących w stanie zbliżonym do wysokoelastycznego. Tymczasem uważa się [179], że bardziej wskazanym dla tego typu połączeń obciążonych na oddzieranie i obciążonych impulsowo byłoby zastosowanie nowej generacji wzmocnionego kleju konstrukcyjnego o charakterystyce pośredniej pomiędzy stanem szklistym i wysokoelastycznym. W przypadku dysponowania

charakterystyką wytrzymałościową wzmocnionego kleju, w oparciu o opracowany model numeryczny możliwe jest skuteczne i efektywne otrzymanie wiarygodnych wyników badań do projektowania lub optymalizacji analizowanego połączenia klejowego.

Celowa byłaby również dalsza analiza wytrzymałości połączeń odcinków taśmy przENOŚnikowej, w aspekcie oceny wytrzymałości zmęczeniowej i wytrzymałości długotrwałej złącza. Uważa się, bowiem [71], że wytrzymałość zmęczeniowa połączeń klejowych jest mniejsza od wytrzymałości statycznej i zależy od konstrukcji połączenia klejowego, w tym od właściwości mechanicznych łączonych elementów i od sposobu obciążenia złącza, oraz od właściwości kleju i technologii wykonania połączenia. Aktualna wersja pakietu Abaqus do modelowania z zastosowaniem MES nie pozwala jednak na przeprowadzenie tego typu analizy numerycznej.

5. Monitorowanie stanu złączy taśm przenośnikowych

Jak wykazano w trakcie wcześniejszej analizy, w badaniach naukowych dotyczących konstrukcji przenośników taśmowych oraz budowy ich elementów nośnych, mały procent prac dotyczy połączeń taśm przenośnikowych, których wytrzymałość w istotny sposób rzutuje na trwałość i niezawodność całego urządzenia transportowego, a nawet całego systemu, w którego skład wchodzi przenośniki taśmowe. Z tego też względu od kilku lat prowadzone są przez autora prace badawcze i wdrożeniowe [137, 138, 140, 141, 144], których celem jest analiza właściwości wytrzymałościowych złączy klejowych w aspekcie opracowania koncepcji układu monitorującego ich stan w czasie pracy przenośnika taśmowego. Dotyczyły one w szczególności badań wytrzymałości i wydłużalności połączeń taśm przenośnikowych, których celem było między innymi przeanalizowanie parametrów eksploatacyjnych przenośnika taśmowego, mających wpływ na częste awarie w wyniku zerwania taśm oraz opracowanie odpowiedniego systemu, który będzie umożliwił monitorowanie pracy urządzenia transportowego i jego automatyczne sterowanie w celu eliminacji sytuacji krytycznych. Równie istotnym celem badań było przeanalizowanie trwałości różnych typów połączeń taśm przenośnikowych w celu analizy możliwości podwyższenia trwałości złącza lub opracowania modyfikacji technologii ich wykonywania bez spowodowania straty wytrzymałości przekładek.

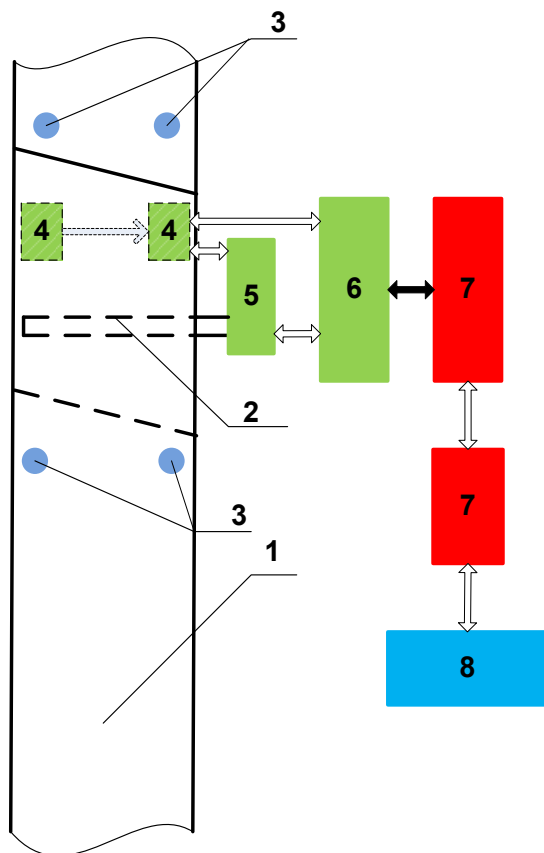


Rys. 5.1 – Reakcja złącza klejowego na siłę rozciągającą [57]: a) złącze nieobciążone, b) złącze pod obciążeniem, c) rozkład naprężeń w obszarze złącza

Badania i pomiary przeprowadzone równolegle w laboratorium oraz w warunkach przemysłowych realizowane były w kontekście opracowania konstrukcji komputerowego systemu monitorującego stan złączy klejowych taśm przesyłowych. Dla realizacji tego celu pracy istotne było poznanie wartości siły zrywającej oraz mechanizmu zerwania wraz z obserwacją zachowania się złącza w chwili bliskiej wystąpieniu jego trwałego uszkodzenia (rys. 5.1). Przeprowadzona wstępna analiza stanu wiedzy na temat wytrzymałości taśm przesyłowych oraz trwałości złączy wykonywanych metodą klejenia, w połączeniu z opisanymi powyżej badaniami laboratoryjnymi pozwoliła na stwierdzenie, że wydłużenie złączy taśm przesyłowych w chwili zerwania jest wielkością zależną od właściwości samej taśmy oraz od jakości wykonanego połączenia klejowego. Istnieje, zatem możliwość monitorowania wydłużenia złączy w czasie pracy przesyłnika, przy jednoczesnym określeniu wartości krytycznej wydłużenia, kiedy przestaje ono mieć charakter wydłużenia dynamicznego, związanego ze zmiennymi warunkami pracy, a staje się wielkością świadczącą o bliskim zerwaniu połączenia.

5.1. System monitorujący stan połączeń taśm przesyłowych

W celu przeprowadzenia testów w warunkach przemysłowych, które pozwoliłyby na weryfikację dotychczasowych założeń oraz wyników badań laboratoryjnych, zaprojektowano i wykonano [134-136, 139, 143] odpowiedni układ monitorujący (rys. 5.2), składający się między innymi z czujnika pola magnetycznego i licznika impulsów oraz komputerowego systemu rejestracji i przetwarzania danych pomiarowych. Modem, pamięć RAM oraz mikroprocesor tworzą jego układ sterujący. Układ przesyłu i obróbki danych składa się natomiast z komputera klasy PC i złączy telefonicznych lub okablowania sieciowego, w zależności od ich dostępności. Komunikacja pomiędzy dwoma pierwszymi układami jest realizowana przy pomocy interfejsu RS-485. Zmianę długości połączeń taśmy w czasie wykrywano mierząc odległość pomiędzy dwoma punktami leżącymi po przeciwnych stronach złącza. Dla identyfikacji punktów pomiarowych, użyto magnesów stałych, wklejonych w taśmę przed i za każdym ze złączy. Położenie magnesów w czasie ruchu przesyłnika jest określane za pomocą półprzewodnikowego czujnika pola magnetycznego. Opis konstrukcji układu pomiarowego systemu monitorującego, jego strukturę oraz szczegóły dotyczące sposobu działania omówiono w dalszej części.



Rys. 5.2 - Schemat ideowy układu monitorującego wydłużenie złączy taśm przesyłających: 1- taśma przesyłająca, 2 - obszar złącza, 3 - znacznik, 4 - czujnik, 5 - urządzenie pomiarowe, 6 - sterownik mikroprocesorowy, 7 - układ transmisji danych cyfrowych, 8 - system komputerowy.

Zasada działania systemu opiera się na odpowiednim wykorzystaniu czujnika magnetycznego znajdującego się pod przesuwającą się taśmą [134-136, 139, 143]. Uzyskane w ten sposób dane pomiarowe są następnie przesyłane do komputera wyposażonego w dedykowany program akwizycji danych, ich analizy oraz wizualizacji wyników. Skonstruowany oryginalny układ monitorujący, pracujący przez okres niemal dwóch lat na typowym przesylniku odstawy z jednej ze ścian kopalni Bogdanka, miał możliwość zasygnalizowania z wyprzedzeniem o zaistnieniu warunków towarzyszących zbliżającemu się zerwaniu taśmy w obszarze złącza. Funkcje użytkowe układu pozwalają również na uzyskanie dodatkowych korzyści wynikających z jego zastosowania

oraz możliwości opcjonalnej rozbudowy w zakresie analizy danych, w tym między innymi poprzez:

- analizowanie parametrów eksploatacyjnych przenośnika taśmowego, mających wpływ na częste awarie w wyniku zerwania taśm oraz rozbudowę o funkcje systemu inteligentnego, który będzie umożliwiał monitorowanie warunków pracy urządzenia i jego automatyczne sterowanie w celu eliminacji sytuacji krytycznych,
- analizowanie na podstawie wyników pomiarów w warunkach rzeczywistych trwałości różnych typów połączeń klejowych taśm przenośnikowych w celu określenia sposobu zwiększenia wytrzymałości połączeń lub opracowania modyfikacji technologii ich wykonywania,
- prowadzenie analizy przyczyn wad wykonawczych połączeń odcinków taśmy,
- praktyczne porównanie właściwości stosowanych materiałów klejowych w aspekcie ich wytrzymałości na rozwarstwienie i ścinanie.

Zbierane dane pomiarowe mogą być również wykorzystane do analizy szeregu aspektów eksploatacyjnych monitorowanego obiektu, w tym na przykład porównania jakości połączeń wykonywanych przez różne zespoły, czy też oceny jakości eksploatacji poszczególnych urządzeń w systemie transportowym.

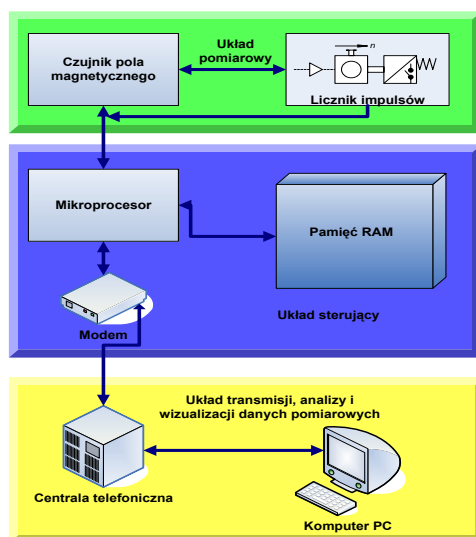
5.1.1. Obiekt i cel badań

Przedmiotem badania w opisywanym przypadku pomiarów w warunkach przemysłowych jest taśma przenośnika kopalnianego, służącego do transportu węgla. Badaniu podlegają złącza owej taśmy, ponieważ jest ona wykonana z wielu elementów ze sobą połączonych. Wraz z upływem czasu, w wyniku naturalnego zużycia skutkującego stopniowym zmniejszaniem się wytrzymałości połączenia, złącza te wydłużają się, czego częstą konsekwencją jest ich nieprzewidziane zerwanie. Rejestrowanie zmian ich długości podczas każdego przejścia nad układem pomiarowym pozwala na bieżące diagnozowanie ich stanu technicznego oraz umożliwia realizację szeregu zadań dodatkowych, dotyczących na przykład analizy danych historycznych, w tym czasu pracy i obciążenia poszczególnych złączy oraz odcinków taśmy pomiędzy nimi. Celem prowadzonych w ten sposób badań w warunkach przemysłowych było zweryfikowanie wyników pomiarów laboratoryjnych dotyczących wielkości

i charakteru zmian długości połączeń taśmy, wraz z upływem czasu przy jednoczesnej weryfikacji skuteczności opracowanej koncepcji komputerowego systemu monitorującego. Dane gromadzone w trakcie pomiarów przemysłowych posłużyły ponadto do rozbudowy tworzonej bazy wiedzy.

5.1.2. System pomiarowy i jego struktura

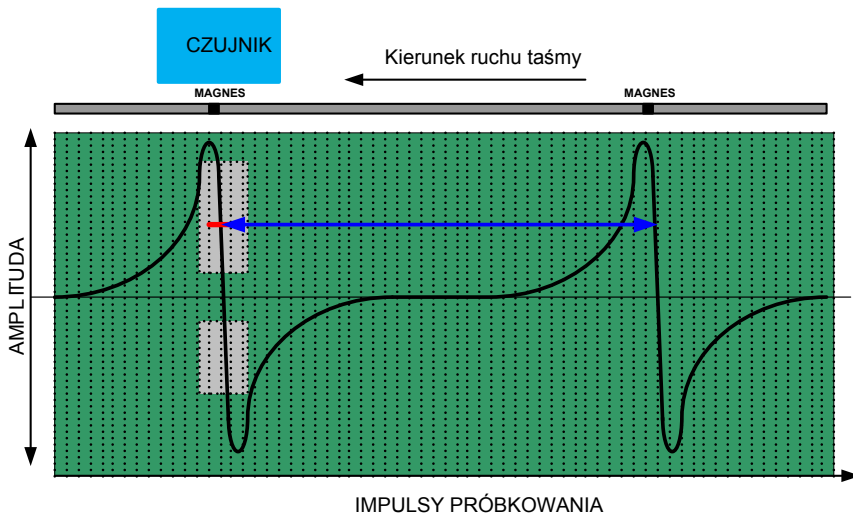
System, który został zaprojektowany i wykonany na potrzeby realizacji badań w warunkach przemysłowych [134-136, 139, 143], należy zaliczyć do diagnostycznych systemów pomiarowych. Na rysunku 5.3 przedstawiono schemat przedmiotowego komputerowego systemu pomiarowego. Podstawowym elementem systemu jest czujnik pola magnetycznego. Zmianę długości złączy taśmy przenośnikowej w czasie pracy rejestrujemy mierząc odległość pomiędzy dwoma punktami leżącymi po przeciwnych stronach złącza. Następnie, porównując ze sobą otrzymane wyniki w kolejnych okresach będziemy mogli stwierdzić, czy odległość pomiędzy punktami pomiarowymi się zmieniła i jak duża jest ta zmiana. Dla określenia punktów pomiarowych użyto magnesów stałych, zamontowanych w warstwie okładkowej taśmy przenośnikowej.



Rys. 5.3 – Schemat ideowy komputerowego systemu pomiarowego

Położenie magnesów jest określane za pomocą półprzewodnikowego czujnika pola magnetycznego. Jeśli zmienia się wartość natężenia pola magnetycznego wokół czujnika, zmienia się jego opór wewnętrzny. Zmiana oporu elektrycznego, powoduje pojawianie się napięcia ($+V_0$, $-V_0$) pomiędzy wyjściami układu. Wartość napięcia jest zależna od wartości natężenia pola magnetycznego, w jakim znajduje się układ.

Czujnik magnetyczny umieszczony jest pod przesuwaną się taśmą. Na schemacie (rys. 5.4) możemy zauważyć, że natężenie pola magnetycznego wzrasta, wraz ze zbliżaniem się do czujnika magnesem. W chwili, gdy magnes mija czujnik, zmienia się zwrot pola magnetycznego. W tym momencie, w najkrótszym czasie następuje największa zmiana natężenia pola magnetycznego. Od wybranego punktu odniesienia (rys. 5.4) będzie rozpoczynał się pomiar, trwający dopóki wartość natężenia pola magnetycznego osiągnie ten sam poziom na końcu okresu próbkowania.

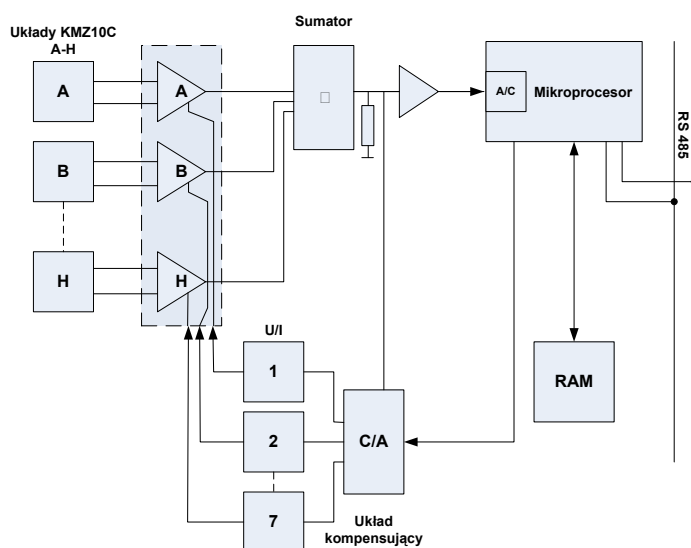


Rys. 5.4 – Zmiana natężenia pola magnetycznego w czasie ruchu taśmy przenośnikowej ze znacznikami

Wybrany punkt odniesienia znajduje się w obszarach zaznaczonych kolorem szarym (rys. 5.4), ponieważ czas, w jakim następuje zmiana wartości amplitudy, jest bardzo krótki. Pozwala to osiągnąć dużą dokładność pomiaru czasu pomiędzy dwoma punktami pomiarowymi. Dokładność ta, wiąże się z częstotliwością próbkowania zegara czujnika. Obszar, w którym zmienia się amplituda, mieści się w kilku impulsach próbkowania. Zatem błąd, z jakim zostanie określony punkt odniesienia będzie mniejszy, niż w przypadku, gdyby punkt odniesienia obrać na przykład w chwili, gdy magnes zbliża się

do czujnika i amplituda pola magnetycznego powoli narasta. Dodatkowo, błąd będzie mniejszy, jeśli pomiędzy dwoma punktami będzie jak najwięcej impulsów próbkowania. Zmiana natężenia pola magnetycznego w opracowanej konstrukcji systemu pomiarowego jest wykrywana przez osiem (A-H) układów KMZ 10C (rys. 5.5), które są ustawione w linii prostopadłej do kierunku ruchu taśmy. Zapewnia to odpowiednią detekcję pola magnetycznego, w wypadku ewentualnego zbiegania taśmy. Napięcie, które powstaje na wyjściach układów KMZ 10C, zostaje wzmacnione przez układy scalone (wzmacniacze operacyjne). W omawianym systemie pomiarowym, występuje obwód kompensacji wzmacniaczy operacyjnych (rys. 5.5). Jest to układ, który pozwala sterować indywidualnie punktem odniesienia, dla każdego wzmacniacza operacyjnego. Umożliwia to uzyskanie jak największej czułości czujnika pola magnetycznego, poprzez maksymalne wykorzystanie wzmacnienia każdego wzmacniacza operacyjnego, bez zniekształcenia otrzymywanego sygnału.

Układ kompensacyjny składa się z układu C/A przetwarzającego sygnał cyfrowy z mikroprocesora na sygnał analogowy, który poprzez układy U/I steruje wejściami kompensacji układów wzmacniaczy operacyjnych. Sygnał wszystkich wyjść wzmacniaczy operacyjnych trafia do sumatora (rys. 5.5). Ten układ cyfrowy, sumuje wartości sygnałów z poszczególnych wzmacniaczy. W ten sposób, uzyskuje się jeden sygnał o amplitudzie równej sumie wszystkich amplitud wejściowych. Sygnał z sumatora trafia poprzez bufor do mikroprocesora, gdzie zostaje zamieniony przez przetwornik A/C z sygnału analogowego na cyfrowy.



Rys. 5.5 – Schemat obwodu kompensacji wzmacniaczy operacyjnych

Pomiar długości złącza taśmy przenośnikowej rozpoczyna się w chwili, gdy układ przetwarzający na podstawie analizy sygnału z czujnika identyfikuje przejście punktu odniesienia przez miejsce lokalizacji czujnika. Punkt ten stanowi początek odcinka pomiarowego i powoduje wyzerowanie stanu licznika impulsów. Pomiar długości złącza jest realizowany w sposób pośredni. Przesuwająca się taśma obraca wałek, który jest umieszczony pod jej górnym odcinkiem w taki sposób, aby pomiędzy nim a przesuwającą się taśmą wystąpił stały nacisk, który uniemożliwia poślizg pomiędzy tymi dwoma elementami. Do wałka przymocowana jest tarcza, na której obwodzie, umieszczone są w równej odległości względem siebie szczeliny.

W układzie licznika impulsów wykorzystano transoptor szczelinowy, który jest układem składającym się z dwóch fotoelementów. Przesuwająca się taśma obraca wałek, który ma stałą, znaną średnicę. Tarcza przymocowana do wałka posiada 200 otworów (szczelin) na obwodzie. Dzięki temu możemy ustalić o ile przemieści się taśma, gdy tarcza obróci się o kąt równy przemieszczeniu tarczy o jeden otwór.

Do zliczania przesuwających się otworów (szczelin) wykorzystujemy transoptor. Początek zliczania impulsów następuje w chwili otrzymania sygnału z czujnika pola magnetycznego o wykryciu punktu odniesienia. Licznik, zaczyna zliczać impulsy płynące z transoptora. Pomiar kończy się, gdy układ przetwarzający zidentyfikuje przejście drugiego punktu odniesienia, którym jest znacznik na końcu odcinka pomiarowego, czyli mierzonego w danej chwili złącza lub odcinka taśmy przenośnikowej. Następuje wtedy zapamiętanie stanu licznika, jego wyzerowanie, a następnie zapisanie zapamiętanej wartości w pamięci RAM, która znajduje się w układzie sterującym. Mikroprocesor umieszczony w układzie licznika impulsów steruje przepływem danych pomiędzy transoptorem, a układem sterującym.

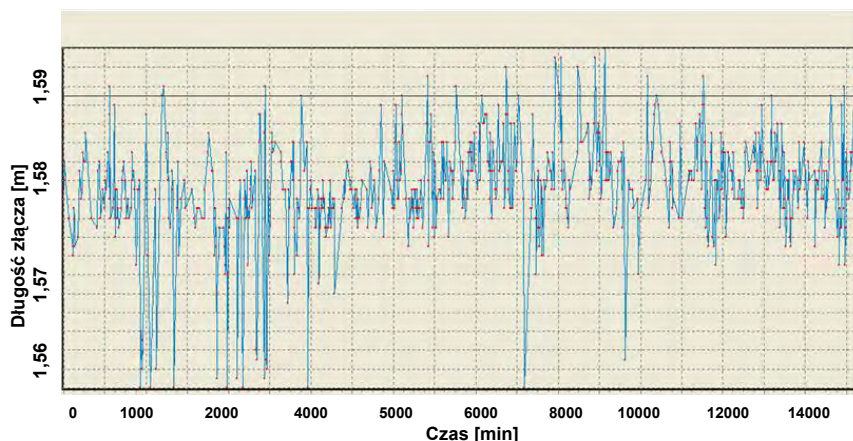
Istotnym elementem przedmiotowego komputerowego systemu pomiarowego jest układ sterujący. Układ sterujący systemu pomiarowego do monitorowania chwilowych zmian długości złączy taśm przenośnikowych składa się z trzech elementów - mikroprocesora, pamięci RAM oraz modemu. Mikroprocesor steruje przepływem danych pomiędzy układem pomiarowym, a układem sterującym. Dane napływające z układu licznika impulsów, przesyłane są do pamięci RAM. Każdy pomiar zostaje zapamiętany według określonego schematu. Stan licznika z układu licznika impulsów zostaje zapisany wraz z godziną, minutą, sekundą oraz datą, zgodną z czasem otrzymania danych przez układ sterujący. Zastosowana w systemie pamięć RAM jest w stanie pomieścić kilka tysięcy pomiarów. Umieszczenie w układzie sterującym dużej pamięci jest podyktowane znaczną ilością napływających danych oraz częstotliwością transferu tych danych przez użytkownika do komputera PC. Duża ilość rejestrowanych danych pomiarowych jest z kolei konsekwencją dużej prędkości poruszania się taśmy oraz często znacznej

na jego trasie liczby złącza, których przejście przez układ pomiarowy jest wielokrotnie rejestrowane każdego dnia.

Komunikacja pomiędzy układem sterującym i pomiarowym, a komputerem użytkownika jest zapewniona przez łącza telefoniczne oraz modemy. Modem umieszczony w układzie sterowania może przysyłać dane w obu kierunkach. Użytkownik za pomocą programu komputerowego do wizualizacji danych oraz ustawień parametrów układu pomiarowego, może regulować wzmocnienie czujnika pola magnetycznego, widząc jednocześnie jak wpływa to na czułość układu. Dzięki modemu, można również przesłać dane z pamięci RAM układu sterującego do komputera PC.

Do podstawowych zadań oprogramowania przedmiotowego systemu pomiarowego należy rejestrowanie i przetwarzanie danych dotyczących procesu, sterowanie pracą urządzeń pomiarowych oraz komunikacja z użytkownikiem. Opracowany program do obsługi omawianego systemu pomiarowo-diagnostycznego działa w środowisku Windows na współpracującym z systemem komputerze PC. Składa się on z dwóch podstawowych części. Pierwsza część to element interfejsu użytkownika programu – okno, w którym identyfikowana jest zmiana pola magnetycznego, rejestrowanego przez czujnik pola magnetycznego. Pozwala ona na ustalenie punktu odniesienia oraz stwierdzenie, czy kompensacja wzmacniaczy operacyjnych jest ustawiona na poziomie, na którym nie następuje ich przesterowanie.

Drugi element interfejsu to okno do przeglądania danych, przetransferowanych z pamięci RAM układu sterującego. Okno to jest podzielone na kolumny, a dane są tam umieszczane według stanu licznika, czasu i daty. Obok okna z danymi znajduje się kolumna przycisków narzędziowych. Służą one do uruchamiania poszczególnych funkcji programu, jak ustawianie kompensacji czujnika magnetycznego lub import danych na komputer użytkownika.



Rys. 5.6 – Okno wizualizujące zmiany długości pojedynczego złącza

W programie komputerowym obsługującym opisywany system pomiarowy istnieje między innymi możliwość wizualizacji zmiany długości konkretnego złącza w czasie pracy przenośnika (rys. 5.6), wizualizacji zmiany długości każdego odcinka taśmy pomiędzy złączami oraz zbiorczej prezentacji tych wielkości dla wszystkich (lub wybranych) złączy danego przenośnika i wszystkich odcinków taśmy pomiędzy nimi. Możliwa jest również analiza statystyczna rejestrowanych wartości, eksport danych pomiarowych, grafik itp.

Najważniejszym elementem konstrukcyjnym systemu (rys. 5.7) jest czujnik magnetyczny umieszczony pod górną częścią trasy przenośnika (rys. 5.8), w najbliższym możliwym do zabudowania układu miejscu przed bębnum napędowym. Taka lokalizacja układu pomiarowego wynikała z przeprowadzonej analizy technologiczności diagnostycznej obiektu. Była konsekwencją faktu, że siła w dowolnym przekroju taśmy ulega zmianie w czasie ruchu przenośnika w zależności od jego obciążenia, ale też i od jego położenia na trasie przenośnika.



Rys. 5.7 - Zabudowa układu pomiarowego na trasie przenośnika w LW Bogdanka S.A.

Układ pomiarowy, pracujący w czasie testów przemysłowych na typowym przenośniku odstawy jednej ze ścian kopalni Bogdanka, ma możliwość zasygnalizowania z wyprzedzeniem o zbliżającym się zerwaniu taśmy w obszarze konkretnego złącza. Gromadzone dane pomiarowe oraz ich analiza z wykorzystaniem opracowanego programu komputerowego umożliwiają wizualizację wyników pomiarów oraz ich wszechstronną analizę. Uzyskiwane w ten sposób dane pozwalają na monitorowanie stanu wszystkich

złączy oraz odcinków taśmy pomiędzy nimi, umożliwiając sygnalizowanie przekroczenia stanów alarmowych, ocenę warunków pracy przenośnika, identyfikację pojedynczego złącza w każdej chwili pracy taśmociągu. Umożliwiają również ocenę efektywności wykonywanych prac serwisowych – na przykład wzmocnienia złącza elementami mechanicznymi. Nie bez znaczenia jest również możliwość długookresowej analizy danych historycznych dla każdego, pojedynczego złącza wchodzącego w skład trasy przenośnika taśmowego począwszy od jego wykonania aż do końcowego okresu pracy.

a)



b)



Rys. 5.8 - Elementy układu pomiarowego na trasie przenośnika: a) czujnik, b) zestaw pomiarowy

Dla przykładu w trakcie pomiarów zarejestrowano dane przed i po wykonaniu czynności serwisowych, prezentujące chwilowe wartości długości przekładowego złącza monitorowanej taśmy przenośnikowej. Z ich analizy [142] wynika, że po interwencji obsługi (wzmocnienie złącza na zmianie remontowej), zarejestrowano spadek wartości chwilowego wydłużenia z niebezpiecznej dla jego trwałości wartości 13% do bezpiecznego poziomu chwilowego wydłużenia wynoszącego 5%.

5.2. System oceny stanu technicznego złączy taśm przenośnikowych

Jak wspomniano już wcześniej, wykonany układ pomiarowy dzięki opracowaniu do jego obsługi odpowiedniego programu przetwarzającego i wizualizującego dane pomiarowe ma możliwość zasygnalizowania z wyprzedzeniem o zaistnieniu warunków towarzyszących zbliżającemu się zerwaniu taśmy w obszarze złącza. Odpowiednia konstrukcja układu pomiarowego oraz sposób analizy danych z wykorzystaniem dedykowanego programu pozwala również na uzyskanie dodatkowych korzyści wynikających z jego zastosowania, do których zaliczyć można między innymi:

- stały pomiar zmiany długości wszystkich złączy oraz odcinków taśmy pomiędzy nimi oraz długości całej taśmy i prędkości jej przesuwu,
- około 1500 pomiarów na dobę z każdego przenośnika w zależności od liczby złączy wchodzących w jego skład,
- wizualizacja zmiany długości złączy w czasie rzeczywistym,
- identyfikacja złączy oraz możliwość ich lokalizacji na trasie przenośnika w każdej chwili jego pracy,
- analiza danych historycznych – możliwość gromadzenia informacji na temat każdego złącza i odcinka taśmy (czas i miejsce wykonania, dane osób wykonujących połączenie, czas pracy, wielkość obciążenia, miejsce pracy itp.),
- możliwość modułowego włączenia systemu do innych układów diagnostyczno – wizualizacyjnych, szczególnie w układach autozarządzania (rys. 5.9),
- możliwość dokładnej informacji na temat czasu pracy przenośnika, chwilowych wartości jego prędkości, czasu przestoju, liczby zatrzymań i czasu ponownego uruchomienia oraz dokładnej wartości całkowitej długości taśmy w każdej chwili pracy,
- obróbka danych umożliwiająca sterowanie predykcyjne pracą przenośnika taśmowego.

Takie cechy systemu sprawiają, że może on być zakwalifikowany do systemów diagnostycznych drugiego poziomu zabezpieczenia [105] procesu transportu, co stanowi wyższy poziom w porównaniu do opisanych wcześniej klasycznych układów blokad i zabezpieczeń. Nie bez znaczenia jest również możliwość długookresowej analizy danych historycznych dla każdego, pojedynczego złącza wchodzącego w skład pętli przenośnika taśmowego poczynając od jego wykonania, aż do końcowego okresu pracy.

Istnieje również możliwość przekształcenia urządzenia monitorującego w urządzenie działające autonomicznie, mające zdolność samodzielnego reagowania na zmieniające się warunki pracy oraz eliminowania stanów powodujących zerwanie taśmy poprzez przewidywanie ewentualnych przyszłych parametrów pracy i konsekwencji ich wystąpienia.

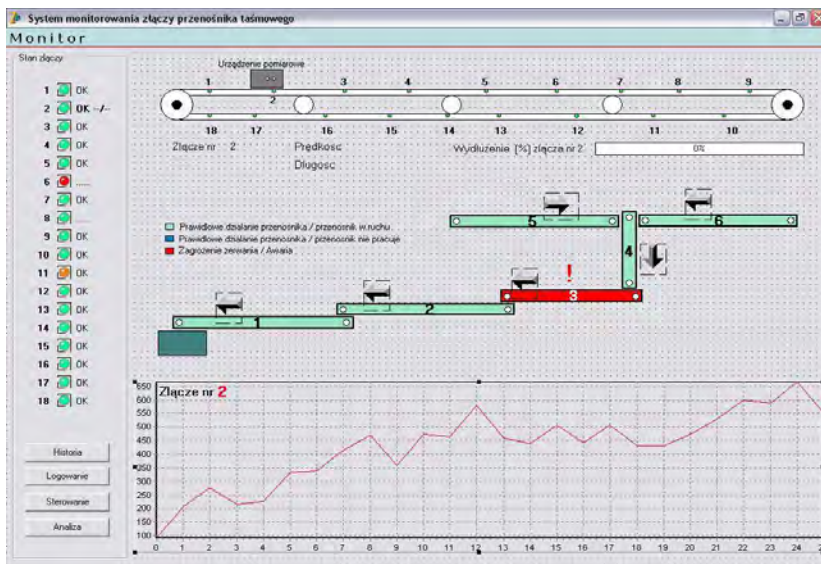
Jak wynika z wcześniejszych analiz, wiedza o charakterze zarówno jakościowym, jak i ilościowym odnośnie zmian wartości parametrów wytrzymałościowych odcinków taśmy i jej złączy w czasie całego cyklu eksploatacji jest niezbędna dla doboru taśmy do danego przenośnika, jak i dla prognozy optymalnego momentu wykonania czynności serwisowych na bazie precyzyjnie określonych w tym przypadku rozkładów czasu pracy i obciążenia.

Może też być przydatna dla oceny i weryfikacji opracowywanych modeli matematycznych rozkładu czasu pracy. Mając, zatem na uwadze powszechność stosowania przenośników taśmowych oraz brak efektywnych systemów monitorująco-sterujących przeciwdziałających awariom tych urządzeń w wyniku zerwania taśm w obszarze złączy, można wnioskować, że wyniki realizacji podjętego tematu przyczynią się nie tylko do zwiększenia wiedzy i doświadczenia w zakresie przemysłowego wykorzystania systemów diagnostyczno-monitorujących, ale też spowodują ograniczenie strat związanych z przestojami w wyniku nieprzewidzianych awarii. Będą też mogły być wykorzystane w przypadku nieefektywnego prowadzenia gospodarki taśmami w oparciu o błędne dane lub założenia.

Można, zatem stwierdzić, że celem kontynuacji prac powinno być zaprojektowanie nie tylko kompleksowego, dyspozytorskiego układu monitorującego (rys. 5.9), ale również i inteligentnego urządzenia wykonawczego, którego włączenie do stosowanego aktualnie systemu monitorowania i sterowania pracą systemów transportowych, pozwoli na efektywną ich rozbudowę oraz pełniejsze włączenie diagnostyki w systemy autozarządzania. Wymierną korzyścią realizacji takiej właśnie koncepcji monitorowania i sterowania pracą analizowanego obiektu jest między innymi:

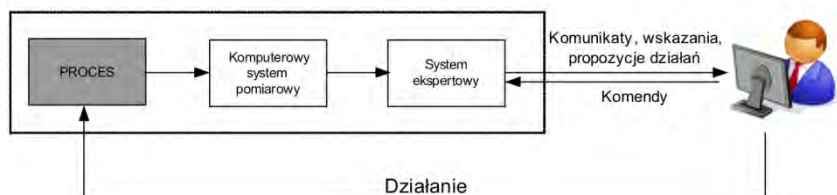
- umożliwienie stałego nadzoru stanu wszystkich złączy taśm przenośnikowych w trakcie ich pracy, z wykorzystaniem metody bezinwazyjnej,
- identyfikacja złączy oraz ocena ich trwałości i niezawodności w czasie całego okresu pracy bez względu na aktualną ich lokalizację,
- eksploracja danych z monitoringu w czasie rzeczywistym wraz z kompleksową analizą danych historycznych szczególnie przydatnych w gospodarce taśmami,
- brak konieczności angażowania firm zewnętrznych dzięki prostej konstrukcji i łatwej obsłudze,

- możliwość oceny efektywności prac serwisowych.



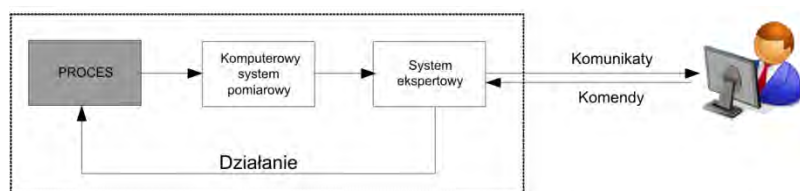
Rys. 5.9 - Koncepcja sposobu wizualizacji danych z systemu monitorowania stanu złączy taśm przenośnikowych

Opracowana koncepcja systemu monitorowania stanu złączy taśm przenośnikowych zgodnie z teorią diagnostyki [35, 105], odpowiada w tym przypadku przeprowadzanemu w czasie rzeczywistym diagnozowaniu obiektu wraz z jednoczesną sygnalizacją i wizualizacją jego stanu. Dzięki takiej realizacji metody monitorowania mamy zatem opracowany diagnostyczny system czasu rzeczywistego dla transportu przenośnikowego. System ten gromadzi w czasie swojej pracy znaczną ilość różnego rodzaju danych, z których można uzyskać szereg informacji na temat diagnozowanego obiektu. Ten nadmiar informacji, który muszą analizować operatorzy korzystając z wizualizacji bieżących parametrów charakteryzujących analizowany obiekt może po pewnym czasie prowadzić do tak zwanego zjawiska przeciążenia informacyjnego [105, 117], często skutkującego pomijaniem istotnych informacji lub też nie wykorzystywania potencjału, jaki posiadają gromadzone przez system w dłuższym okresie dane pomiarowe. Sam system monitorujący mimo szeregu niezaprzeczalnych jego zalet nie jest, zatem w dłuższej perspektywie czasu rozwiązaniem wystarczającym do optymalnego wykorzystania generowanych przezeń informacji.



Rys. 5.10 – Koncepcja ekspertowego systemu wspomagania decyzji nadzoru transportu taśmowego

Celowe zatem staje się jego rozbudowanie do w pełni zautomatyzowanego, komputerowego systemu wspomagającego diagnozowanie analizowanego obiektu. Jego zadaniem powinno być w pierwszej kolejności przetwarzanie gromadzonych danych i ich analizowanie w kontekście wspomagania decyzji podejmowanych przez pracowników nadzoru lub też możliwie w pełni automatyczne podejmowanie takich decyzji, z ewentualnym ich wykorzystaniem do bieżącego lub doraźnego sterowania systemem transportu.

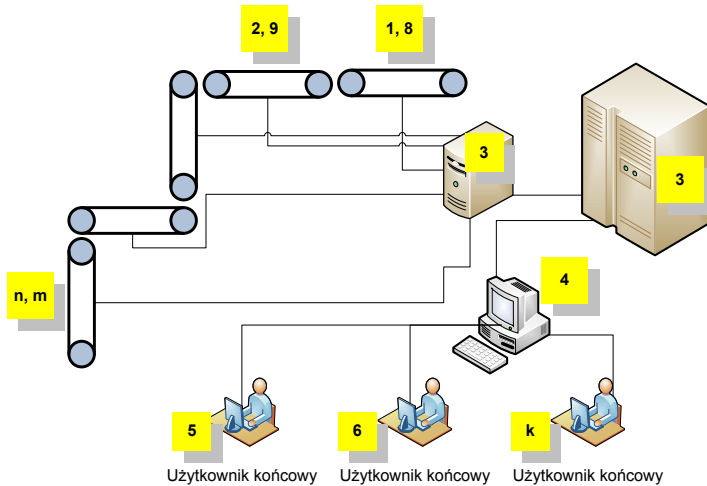


Rys. 5.11 – Koncepcja ekspertowego systemu sterowania zabezpieczającego transportu taśmowego

W ten sposób opracowany system monitorowania złączy taśm przenośnikowych i odcinków taśmy pomiędzy nimi stały się systemem ciągłego dozoru (nadzoru i zabezpieczenia) stanu analizowanego obiektu i w zależności od przeznaczenia - wspomagania decyzji zapewniających właściwe działanie (rys. 5.10) lub sterowania zabezpieczającego przed awarią i jej skutkami (rys. 5.11). Zgodnie z terminologią diagnostyki [105], nadzór oznacza bowiem monitorowanie obiektu i podejmowanie czynności dla utrzymania jego właściwego działania, zabezpieczenie to z kolei działania i środki techniczne likwidujące potencjalnie niebezpieczny przebieg procesu lub też zapobiegające skutkom takiego przebiegu.

Bazując zatem na dotychczasowych wynikach prowadzonych prac możliwe jest również zbudowanie kompleksowego systemu ciągłego dozoru przenośników taśmowych tworzących system transportu w przedsiębiorstwach (rys. 5.12). Elementami takiego systemu mogą być urządzenia diagnostyczne

analizujące parametry pracy poszczególnych przenośników, szczególnie istotne dla zapewnienia ich niezawodności, połączone w kompleksowy system oraz elementy komputerowego systemu doradczego i sterującego.



Rys. 5.12 - Schemat ideowy koncepcji kompleksowego systemu monitorowania transportu przesyłowego: 1, 2, ..., n – urządzenia pomiarowe; 3 – system transmisji danych na duże odległości; 4 – oprogramowanie analizujące dane pomiarowe w czasie rzeczywistym, gromadzące i przetwarzające dane archiwalne oraz sterujące systemem; 5, 6, ..., k – interfejsy użytkownika końcowego kompatybilne z systemem dyspozytorskim przedsiębiorstwa; 8, 9, ..., m – urządzenia sygnalizacyjne.

Podstawowym celem systemu będzie w pierwszej kolejności automatyczne monitorowanie stanu wszystkich połączeń klejowych w celu wykrywania zmian w odniesieniu do każdego pojedynczego złącza, które mogą prowadzić do jego zerwania oraz śledzenie historii pracy wszystkich taśm i ich pojedynczych odcinków. System taki będzie miał charakter uniwersalny, mogący w dalszej kolejności być zastosowanym w różnych przedsiębiorstwach, stosownie do ich specyfiki oraz wymogów branżowych. Dzięki swojej uniwersalności oraz elastyczności modułów oprogramowania pozwoli on na połączenie z innymi systemami diagnostyczno-monitorującymi o charakterze dyspozytorskim.

Problemem działania tego typu systemu jest fakt konieczności gromadzenia i przetwarzania różnego rodzaju danych, często trudnych do opisu lub analizy w czasie rzeczywistym. Istotnym byłoby zatem rozbudowanie systemu monitorowania złączy taśm przesyłowych do postaci diagnostycznego systemu doradczego w układzie kompleksowej diagnostyki opierającej się

na narzędziach inteligentnych. Jak zauważają Żur i Hardygóra [209], na trwałość taśmy wpływa bowiem tyle różnorodnych czynników, że często praktycznie niemożliwe jest dokładne określenie, czy też prognozowanie lub eliminowanie ze stosownym wyprzedzeniem stanów awaryjnych. Jest to o tyle istotne, że przecież taśma przenośnikowa, jej poszczególne odcinki, jak i połączenia tych odcinków pracują w różnym czasie, w różnych lokalizacjach i przy często skrajnie odmiennych warunkach obciążenia.

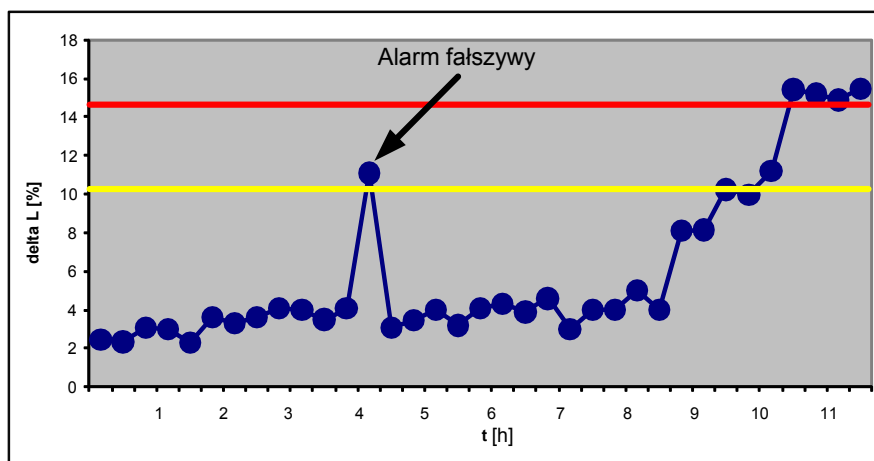
Taki kierunek rozwoju przenośników taśmowych i ich urządzeń peryferyjnych jest zgodny z dążeniem do szerszego stosowania w ich nadzorowaniu i sterowaniu systemów wspomaganie komputerowego, w tym szczególnie systemów w pełni zautomatyzowanych.

6. System ekspertowy zarządzania eksploatacją taśm przenośnikowych

Wnioski z dotychczasowych rozważań niniejszej pracy pozwalają na stwierdzenie, że niezwykle istotnym z praktycznego punktu widzenia jest dążenie do zwiększenia trwałości jednego z podstawowych elementów przenośnika, a jednocześnie jego najbardziej newralgicznego miejsca, jakim są łączenia odcinków taśmy. Podstawowa trudność w tym przypadku wynika między innymi z faktu, że siły w taśmie wpływające na obciążenie, a tym samym na trwałość jej samej, jak i jej złączy zmieniają się zależnie od obciążenia przenośnika. Dlatego też stosowane w tym przypadku skomplikowane metody na przykład obliczania stanów nieustalonych są często niedokładne, co wynika z braku precyzyjnych danych wejściowych oraz niedokładnego wyznaczenia warunków brzegowych. Z drugiej zaś strony istotnym wyzwaniem jest tu również optymalizacja siły napięcia taśmy z uwzględnieniem różnych warunków obciążenia przenośnika, co w konsekwencji powinno przyczynić się do zwiększenia trwałości taśmy oraz jej połączeń. Możliwe w takim przypadku rozwiązanie to między innymi odpowiednia konstrukcja urządzeń mierzących napięcie w taśmie oraz dobranie odpowiedniego algorytmu sterowania. Niestety z racji charakteru problemu, niedostatecznej wiedzy na jego temat oraz braku odpowiednich danych pomiarowych – rozwiązanie z zastosowaniem klasycznych algorytmów sterowania wydaje się tu być nieosiągalne.

Generowane przez układ pomiarowy znaczne ilości danych i towarzyszących im informacji, szczególnie w przypadku dużej liczby monitorowanych złączy klejowych znajdujących się na kilku lub kilkunastu przenośnikach rozbudowanego systemu transportowego powoduje liczne komplikacje związane z interpretacją gromadzonych danych, utrudniając tym samym skuteczne podejmowanie decyzji przez personel nadzorujący. Analizowany obiekt to przykład systemu, na który wpływ ma wiele czynników, które nie zostały precyzyjnie określone lub ich losowość i nieprzewidywalność jest znaczna, również z uwagi na niemożliwość, trudność lub też nieopłacalność pomiaru pewnych istotnych, charakteryzujących go wielkości. Mamy w tym przypadku do czynienia z obiektem trudnym do opisu, chociażby z racji jego zależności od dużej liczby nieprzewidywalnych zmiennych, które w szeregu przypadków są ponadto trudne do precyzyjnego określenia. Dodatkowo, z racji charakteru pracy przenośników, chwilowych ich obciążeń znacznymi siłami, rejestrowane wartości chwilowej zmiany długości złącza mogą generować fałszywe alarmy (rys. 6.1). Skutkować będą one nieuzasadnionym zatrzymaniem systemu transportu, niepotrzebną inspekcją złącza, czy też koniecznością weryfikacji

generowanego sygnału przez operatora. Operator zatem staje w takim przypadku przed koniecznością stałego podejmowania decyzji, analizy zbioru wielu danych, obserwacji ich zmiany, czy też przewidywania przyszłych wartości (trendu ich zmiany w zakresie wartości bezpieczne / stan zagrożenia / wartości przekraczające poziom alarmowy). Jest to, zatem okoliczność dotycząca podejmowania decyzji w warunkach niepewności [78, 113] – nie dysponujemy bowiem informacjami o prawdopodobieństwie wystąpienia poszczególnych stanów (bezpieczny/zagrożenie/alarm), a jedynie możemy przewidywać przyszłe wartości analizowanych sygnałów mających postać dyskretnego szeregu czasowego.



Rys. 6.1 – Zmiana długości złącza w czasie pracy przonośnika – okoliczność generowania fałszywego alarmu przez system diagnostyczny

Prowadzona przy pomocy opisywanego systemu monitorującego diagnostyka eksploatacyjna pojedynczego przonośnika taśmowego, czy też całego systemu transportu przonośnikowego pozwala na skuteczną ocenę stanu bieżącego złącza klejowych. W przypadku zarejestrowania pierwszych symptomów świadczących o obniżeniu wytrzymałości któregoś ze złączy, co w konsekwencji doprowadza do jego zerwania, istotnym byłoby dodatkowo prognozować, w jakim horyzoncie czasowym złącze to będzie zachowywać parametry gwarantujące poprawną pracę przonośnika. Informacja taka niezbędna jest dla pracowników dozoru, decydujących o konieczności natychmiastowego zatrzymania systemu transportu przonośnikowego w celu dokonania niezbędnej naprawy. Awaria skutkowałaby, bowiem znacznie dłuższym postojem niezbędnym do eliminacji powstałych szkód i uszkodzeń. W optymalnym rozwiązaniu najwyższej generacji niezbędne byłoby nie tylko gromadzenie i przetwarzanie bieżących

i historycznych danych pomiarowych oraz generowanie na tej podstawie uzasadnionych sygnałów alarmowych, doradczych informacji i wskazań dla obsługi, ale też samodzielne podejmowanie przez system działań korygujących. Innymi słowy cechą wyróżniającą taki system monitorujący byłby proces wnioskowania realizowany przy pomocy systemów eksperckich, generujący i weryfikujący automatycznie diagnozy na potrzeby operatora, ale też mający zdolność samodzielnego podejmowania działań wykonawczych. Potrzeba zastosowania w tym przypadku inteligentnego systemu ekspertowego wynika z szeregu niejednoznaczności oraz problemów praktycznych występujących w przypadku monitorowania stanu złączy klejowych taśm przenośnikowych. Można wśród nich wymienić różną dynamikę powstawiania symptomów typowych dla zbliżającego się zerwania taśmy w obszarze złącza, zmienne warunki pracy elementów systemu transportu przenośnikowego oraz różny czas pracy i warunki eksploatacji poszczególnych odcinków taśmy przenośnikowej i ich połączeń. Symptomy świadczące o uszkodzeniu z różnym nasileniem i o różnym charakterze mogą pojawiać się pojedynczo lub wielokrotnie. Dodatkowym problemem w tym przypadku jest również częsta niejednoznaczność wiedzy na temat eksploatowanego obiektu oraz wymagany bardzo krótki czas potencjalnej reakcji systemu. Inteligentny system doradczy będzie zatem w tym przypadku systemem dynamicznym, typowym dla nadzorowania rozbudowanych procesów, których cechą charakterystyczną są zmienne warunki pracy oraz potrzeba uwzględniania, co najmniej dwóch skali czasu – czasu mikro i czasu makro [105], co jest niezwykle istotne w przypadku całego cyklu życia pojedynczego złącza lub odcinka taśmy podlegającego częstym relokacjom. Z tego też względu potrzeba stosowania w przypadku rozbudowanego systemu transportu przenośnikowego odpowiednio skutecznego i zaawansowanego układu monitorującego i diagnozującego wymaga zastosowania wyrafinowanych, inteligentnych narzędzi wspomagających ich działanie. Uważa się [105], że opracowanie narzędzi informatycznych wspomagających proces wnioskowania w diagnostyce technicznej jest utrudnione z racji braku ogólnych metod formalnego zapisu wiedzy diagnostycznej, braku możliwości pełnej algorytmizacji procesu wnioskowania oraz trudności związanych z praktycznym skonstruowaniem układów działających w czasie rzeczywistym. Z tego też względu istotnym jest podejmowanie działań służących rozwojowi metod diagnostycznych wzbogaconych o systemy wspomagania decyzji z wykorzystaniem najnowszych osiągnięć i wiedzy w zakresie technik inteligentnych.

6.1. Inteligentny system doradczy diagnostyki złączy taśm przENOŚnikowych

W analizowanym przypadku pomiarów zmian długości złączy monitorowanych przez komputerowy system pomiarowy możemy przyjąć założenie, że obserwacje prowadzone są w dyskretnych, równych odstępach czasu t . Dla każdego z monitorowanych złączy dysponujemy zatem danymi z oceny zmiany jego długości ΔL w chwilach czasu $t-1, t-2, \dots, t-n$, co odpowiada wartościom $\Delta L_{t-1}, \Delta L_{t-2}, \Delta L_{t-3}, \dots, \Delta L_{t-n}$. Celem analizy jest określenie przyszłych wartości wydłużenia monitorowanego złącza taśmy przENOŚnikowej $\overline{\Delta L}_t(w)$, oznaczających prognozę w przyszłym momencie $t+w$, to znaczy z wyprzedzeniem w , o jak najniższych wartościach średnich odchyień $\Delta L_{t+w} - \overline{\Delta L}_t(w)$. W przypadku oceny potencjalnego wystąpienia fałszywego alarmu, odchylenie wartości rzeczywistej i prognozowanej posłuży, jako składnik reguły wnioskowania.

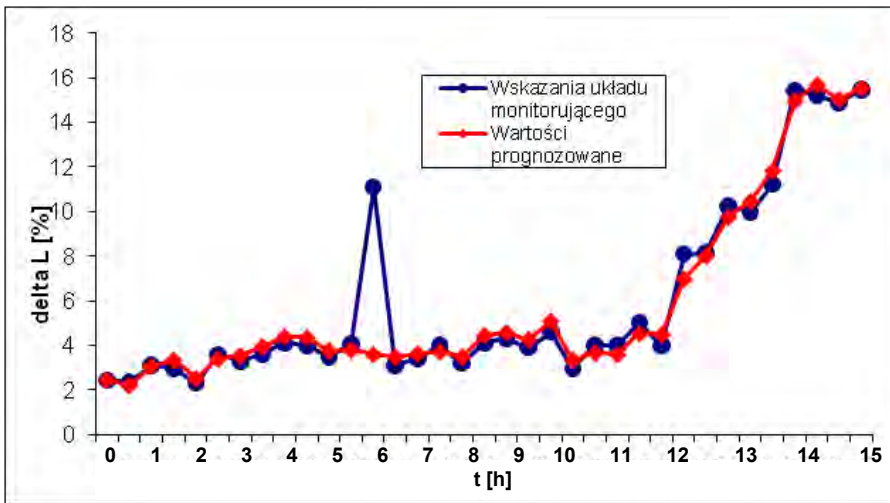
Ze względu na dobre właściwości uogólniające do rozwiązywania zadań o charakterze predykcijnym, jedną z możliwości jest w tym przypadku zastosowanie sztucznych sieci neuronowych [194]. W dziedzinie predykcji zadaniem sztucznej sieci neuronowej jest określenie przyszłych zachowań analizowanego systemu na podstawie ciągu wartości z przeszłości i wartości bieżących. Sztuczne sieci neuronowe posiadają szereg cech, dzięki którym stanowią przydatne narzędzie modelowania i prognozowania szeregów czasowych

Mając dane wartości ocenianej zmiennej w chwilach poprzedzających predykcję ($t-1, t-2, \dots, t-n$) sieć wylicza prognozę, jaką będzie przyszła wartość analizowanego ciągu czasowego. Uwzględniając aktualny błąd predykcji oraz wartości tego błędu z przeszłości możliwe jest przeprowadzanie adaptacji wag sieci, co umożliwia dokładniejszą predykcję w przyszłości.

Proces prognozowania z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych w przypadku przewidywania przyszłych wartości wydłużenia złącza klejowego został dla potrzeb niniejszej pracy przeprowadzony z wykorzystaniem pakietu Matlab przy zachowaniu standardowej procedury postępowania. Procedura ta obejmowała następujące działania [132, 165, 175, 210]: wstępną analizę danych, wybór danych uczących, testujących oraz weryfikujących, uczenie sieci, testowanie sieci, dobór architektury sieci o najlepszym odwzorowaniu oraz jej zastosowanie jako eksperymentalnego predyktora. Przed rozpoczęciem budowy modelu szeregu czasowego i przed prognozowaniem zgromadzone dane poddawane są z zasady analizie wstępnej obejmującej między innymi badanie poprawności danych, ocenę ich jednorodności, przekształcenia danych, redukcję zbioru danych wejściowych, dekompozycję danych, przyjęcie sposobu reprezentacji danych jakościowych oraz ich skalowanie. W analizowanym

przypadku do prognozowania wykorzystano dane pomiarowe zarejestrowane w czasie pracy układu monitorującego w warunkach przemysłowych.

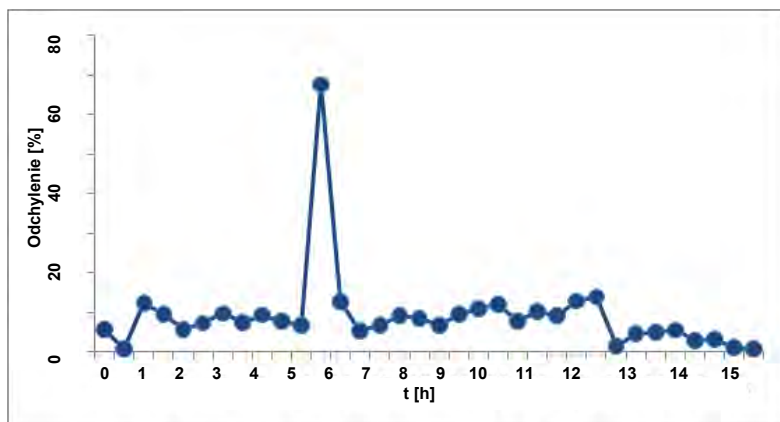
Testowanie procedury doboru predyktora neuronowego rozpoczęto zatem od sprawdzenia wpływu ilości danych wejściowych na wynik uczenia sieci. W przypadku szeregów czasowych otrzymanych z pomiarów zmian długości przykładowych złączy taśmy przenośnikowej o dużej ilości punktów pomiarowych (chwile poprzedzające predykcję od chwili czasu $t-200$) testowane architektury sieci nie dawały satysfakcjonującego odwzorowania. Najlepsze wyniki uzyskano stosując do uczenia sieci dane reprezentujące szereg czasowy od $t-20$ do t . Z testowanych w analizie architektur sieci neuronowych, najlepsze wyniki (odpowiednia zdolność aproksymacji, jak i generalizacji) uzyskano dla jednokierunkowej sieci wielowarstwowej (ang. MLP – *multilayer perceptron*) o architekturze 1-4-4-1 (dwie warstwy ukryte neuronów, każda z czterema neuronami), której błąd odwzorowania wyniósł 0,06 (rys. 6.2).



Rys. 6.2 – Wyniki prognozowania przyszłych wartości długości przykładowego złącza klejonego taśmy przenośnikowej

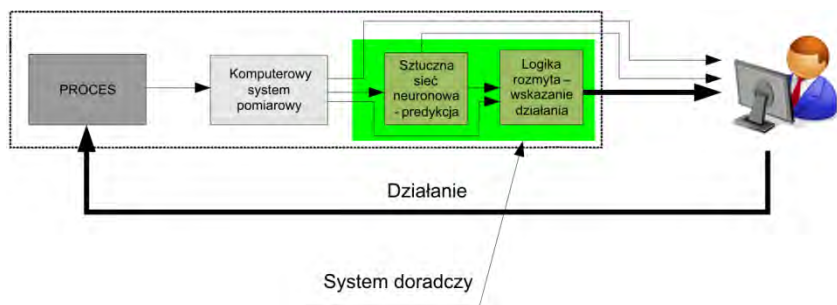
Modele oparte na jednokierunkowych sieciach wielowarstwowych z reguły mają oszczędną strukturę, co powoduje, że czas ich uczenia oraz czas realizacji obliczeń są krótkie oraz nie wymagają one dużych pamięci. Jednokierunkowa sieć wielowarstwowa posiada architekturę warstwową, wyróżnioną warstwą wejściową, co najmniej jedną warstwą ukrytą oraz warstwą wyjściową. Połączenia w tego typu sieci umożliwiają komunikację pomiędzy neuronami znajdującymi się w sąsiadujących ze sobą warstwach. Wszystkie neurony wchodzące w skład sieci dokonują agregacji danych wejściowych poprzez

wyznaczenie sumy ważonych wejść, czyli przy pomocy liniowej formuły agregacji. Funkcja aktywacji neuronów wejściowych ma charakter liniowy, neuronów ukrytych nieliniowy (najczęściej sigmoidalny), zaś neuronów wyjściowych liniowy bądź nieliniowy.



Rys. 6.3 – Odchylenie wartości rzeczywistej i prognozowanej

Prognozowanie przyszłych wartości chwilowej długości złącza taśmowego lub też jego wydłużenia jest istotne z racji konieczności wykorzystania predykcji do oceny odchylenia wartości rzeczywistej i prognozowanej (rys. 6.3), która to posłuży, jako element reguły wnioskowania systemu doradczego.

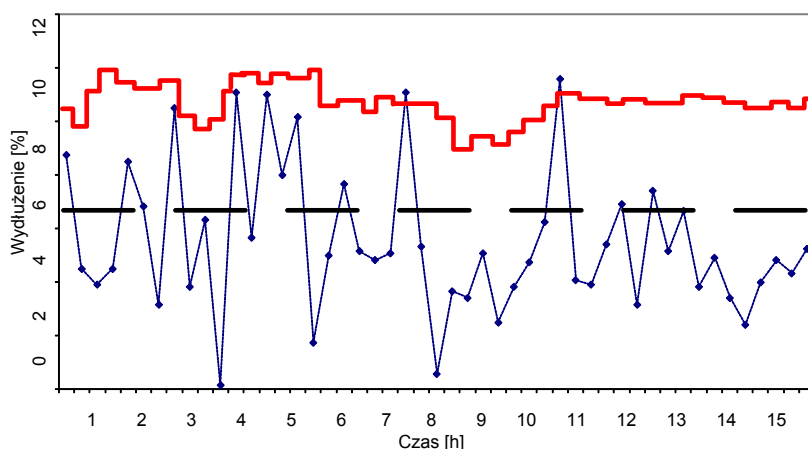


Rys. 6.4 – Elementy inteligentnego systemu doradczego monitorowania złączy taśmowych

Zadaniem takiego systemu będzie zastąpienie eksperta przy podejmowaniu decyzji będących reakcją na przekazywane przez system pomiarowy komunikaty na temat stanu monitorowanych złączy. Moduł przetwarzający

będzie miał również za zadanie eliminowanie fałszywych alarmów generowanych przez system diagnostyczny (rys. 6.4), z ewentualnym opcjonalnym wykorzystaniem techniki adaptacyjnych progów alarmowych (rys. 6.5).

Na podstawie analizy odchylenia wartości rzeczywistej i prognozowanej możemy stwierdzić, że w przypadku, gdy przyjmuje ono duże wartości, generowany w takiej sytuacji sygnał alarmowy jest alarmem fałszywym. Problemem pozostaje precyzyjne określenie wartości granicznej obliczonego odchylenia.



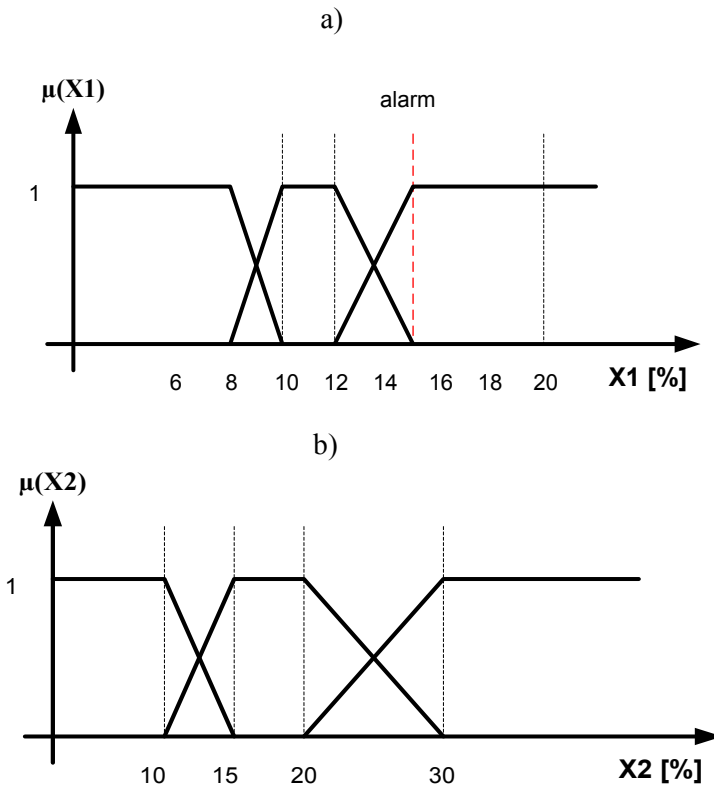
Rys. 6.5 – Analiza danych pomiarowych w oparciu o metodę adaptacyjnych progów sygnału alarmowego

Analizowany system doradczy diagnostyki stanu złączy taśm przENOŚnikowych w proponowanym rozwiązaniu ma za zadanie zastąpienie osoby obsługującej w sytuacji generowania przez układ monitorujący dużej ilości danych, trudnych dla operatora systemu do ich szybkiej analizy i interpretacji w czasie rzeczywistym. Zastąpienie operatora wymaga w tym przypadku reprezentacji posiadanej przez niego wiedzy. Z racji charakteru obiektu oraz posiadanej na jego temat wiedzy jedną z możliwości rozwiązania takiego problemu jest skonstruowanie jego modelu rozmytego opierającego się na wiedzy eksperta, gdzie reguły określające zależności wejścia/wyjście mogą być sformułowane, jako zbiór słownych relacji o wartościach lingwistycznych (model werbalny).

Taki sposób postępowania pozwala na szybkie zbudowanie stosunkowo nieskomplikowanego modelu rozmytego, który może być dość precyzyjny. Jak stwierdza, bowiem Piegat [173], precyzyjne modele werbalne udaje się

skonstruować jedynie w przypadku systemów mechanicznych i elektrycznych. Metoda modelowania rozmytego na bazie wiedzy eksperta umożliwia tworzenie modeli typu Mamdaniego, w których modelowany system traktuje się na zasadzie czarnej skrzynki. Model Mamdaniego jest zbiorem reguł, z których każda definiuje jeden rozmyty punkt (tzw. ziarno) w przestrzeni odwzorowania wejścia-wyjście realizowanego przez system. Zbiór ziaren tworzy wykres rozmyty, w którym interpolacja między punktami zależy od elementów aparatu logiki rozmytej.

Model analizowanego obiektu zawiera dwa wejścia x_1 , x_2 oraz jedno wyjście y . Wejście x_1 to chwilowa wartość zarejestrowanego przez komputerowy system pomiarowy wydłużenia względnego pojedynczego złącza. Wejście x_2 reprezentuje odchylenie rzeczywistej wartości wydłużenia względnego i prognozy tej wartości dla danej chwili czasu t , która to została wskazana przez sieć neuronową prognozowania wartości analizowanego szeregu czasowego.



Rys. 6.6 – Funkcje przynależności do zbiorów rozmytych wejść x_1 (a) oraz x_2 (b)

Budowa modelu rozmytego wymaga między innymi zdefiniowania funkcji przynależności zmiennych wejściowych, określenia bazy reguł oraz mechanizmu inferencyjnego, zdefiniowania funkcji przynależności zmiennej wyjściowej. W pierwszym etapie tworzenia modelu rozmytego w bloku fuzyfikacji przeprowadzona zostaje operacja rozmywania, której celem jest określenie stopnia przynależności wprowadzonej ostrej wartości wejścia do odpowiedniego zbioru rozmytego, do czego niezbędne jest dokładne zdefiniowanie funkcji przynależności do zbiorów rozmytych poszczególnych wejść (rys. 6.6). Funkcje przynależności do zbiorów rozmytych wejść x_1 (rys. 6.6a) oraz x_2 (rys. 6.6b) zostały określone na podstawie posiadanej wiedzy, pochodzącej z obserwacji zachowania się złączy klejowych w czasie ich obciążenia, popartych sprawdzającymi badaniami laboratoryjnymi opisanymi we wcześniejszych rozdziałach.

Dla każdego przypadku zmiennej wyjściowej wykorzystano po trzy funkcje przynależności – lewą zewnętrzną, trapezową niesymetryczną oraz prawą zewnętrzną, wykorzystując tym samym zalety tego typu funkcji wielokątnych, w tym tę, że do ich zdefiniowania wystarczy minimalna w porównaniu z innymi funkcjami przynależności ilość informacji.

Chwilową wartość zarejestrowanego przez układ pomiarowymi wydłużenia względnego złącza na podstawie opisanych wcześniej wyników badań laboratoryjnych cech eksploatacyjnych taśm i ich złączy (rozdz. 4.1) możemy uznać za małą (bezpieczną), jeśli ma wartość z przedziału od 0% do 10%, za średnią (niebezpieczną), jeśli zawiera się w przedziale od 8% do 15%, oraz dużą (alarmową) odpowiednio dla wartości większych od 12% (rys. 6.6a). Analogicznie, odchylenie wartości rzeczywistej chwilowego wydłużenia oraz wartości prognozowanej przez sztuczną sieć neuronową jest małe jeśli przyjmuje wartość od zera do 15%, średnie dla wartości od 10% do 30% oraz duże, jeśli przekracza 20% (rys. 6.6b).

W kolejnym etapie budowy modelu dla przeprowadzenia obliczeń bloku inferencja niezbędne jest zdefiniowanie bazy reguł, mechanizmu inferencyjnego oraz funkcji przynależności wyjścia modelu y , co pozwoli na obliczenie wynikowej wartości tej funkcji. Mechanizm inferencyjny realizujący działanie tego bloku (obliczenia wynikowej funkcji przynależności $\mu_{wyn}(y)$) składa się z następujących części [173]: części obliczających stopień spełnienia przesłanek oraz stopień aktywizacji konkluzji poszczególnych reguł R_i , oraz części określającej wynikową postać funkcji przynależności wyjścia $\mu_{wyn}(y)$ na podstawie stopnia aktywizacji konkluzji poszczególnych reguł.

Odpowiedzią systemu w przypadku analizy wydłużenia złączy taśm przENOśnikowych ma być wskazanie dla operatora dotyczące koniecznej do podjęcia decyzji. System może w tym przypadku wskazywać na prawidłową pracę złącza (y_1), zalecać kontrolę stanu (y_2), generować sygnał ostrzeżenia ze wskazaniem konieczności modyfikacji (wzmocnienia) złącza - (y_3), oraz może też generować sygnał alarmowy z zaleceniem natychmiastowego

zatrzymania taśmy (y_4). Dla tak zdefiniowanych zmiennych wejściowych i zmiennej wyjściowej oraz określonych ich funkcji przynależności należy stworzyć bazę reguł, która ma za zadanie umożliwienie modelowi rozmytemu uzyskania pożądanej dokładności (tabela 6.1).

Tabela 6.1 – Baza reguł modelu

	x2		
x1	małe	średnie	duże
małe	y_1	y_1	y_2
średnie	y_3	y_2	y_1
duże	y_4	y_3	y_2

Baza reguł modelu będzie miała zatem postać:

- R1:** IF (x_1 =małe) AND (x_2 =małe) THEN ($y=y_1$),
- R2:** IF (x_1 =małe) AND (x_2 =średnie) THEN ($y=y_1$),
- R3:** IF (x_1 =małe) AND (x_2 =duże) THEN ($y=y_2$),
- R4:** IF (x_1 =średnie) AND (x_2 =małe) THEN ($y=y_3$),
- R5:** IF (x_1 =średnie) AND (x_2 =średnie) THEN ($y=y_2$),
- R6:** IF (x_1 =średnie) AND (x_2 =duże) THEN ($y=y_1$),
- R7:** IF (x_1 =duże) AND (x_2 =małe) THEN ($y=y_4$),
- R8:** IF (x_1 =duże) AND (x_2 =średnie) THEN ($y=y_3$),
- R9:** IF (x_1 =duże) AND (x_2 =duże) THEN ($y=y_2$).

Dla ograniczenia rozmiaru modelu poprzez zmniejszenie liczby reguł możliwe jest alternatywne zdefiniowanie funkcji przynależności zmiennej wejściowej x_2 opisanej jedynie lewą i prawą zewnętrzną funkcją przynależności. Odchylenie wartości rzeczywistej chwilowego wydłużenia oraz wartości prognozowanej przez sztuczną sieć neuronową będzie w takim przypadku małe jeśli przyjmuje wartość od zera do 30% oraz średnie dla wartości przekraczających 25%. W konsekwencji takiego ograniczenia baza reguł modelu składać się będzie jedynie z sześciu reguł:

- R1:** IF (x_1 =małe) AND (x_2 =małe) THEN ($y=y_1$),
- R2:** IF (x_1 =małe) AND (x_2 =duże) THEN ($y=y_2$),
- R3:** IF (x_1 =średnie) AND (x_2 =małe) THEN ($y=y_3$),
- R4:** IF (x_1 =średnie) AND (x_2 =duże) THEN ($y=y_1$),
- R5:** IF (x_1 =duże) AND (x_2 =małe) THEN ($y=y_4$),
- R6:** IF (x_1 =duże) AND (x_2 =duże) THEN ($y=y_1$).

Możliwe jest również połączenia w jedną regułę, reguł posiadających identyczną konkluzję. Działanie takie pozwoli zmniejszyć liczbę reguł w bazie. Otrzymamy wtedy bazę reguł w postaci:

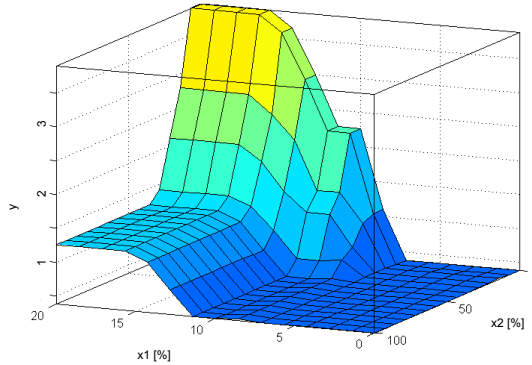
- R1:** IF (x_1 =małe) AND (x_2 =małe) OR (x_1 =małe) AND (x_2 =średnie) OR (x_1 =średnie) AND (x_2 =duże) THEN ($y=y_1$),
R2: IF (x_1 =małe) AND (x_2 =duże) OR (x_1 =średnie) AND (x_2 =średnie) OR (x_1 =duże) AND (x_2 =duże) THEN ($y=y_2$),
R3: IF (x_1 =średnie) AND (x_2 =małe) OR (x_1 =duże) AND (x_2 =średnie) THEN ($y=y_3$),
R4: IF (x_1 =duże) AND (x_2 =małe) THEN ($y=y_4$).

Oraz odpowiednio dla drugiego rozpatrywanego przypadku:

- R1:** IF (x_1 =małe) AND (x_2 =małe) OR IF (x_1 =średnie) AND (x_2 =duże) OR IF (x_1 =duże) AND (x_2 =duże) THEN ($y=y_1$),
R2: IF (x_1 =małe) AND (x_2 =duże) THEN ($y=y_2$),
R3: IF (x_1 =średnie) AND (x_2 =małe) THEN ($y=y_3$),
R4: IF (x_1 =duże) AND (x_2 =małe) THEN ($y=y_4$).

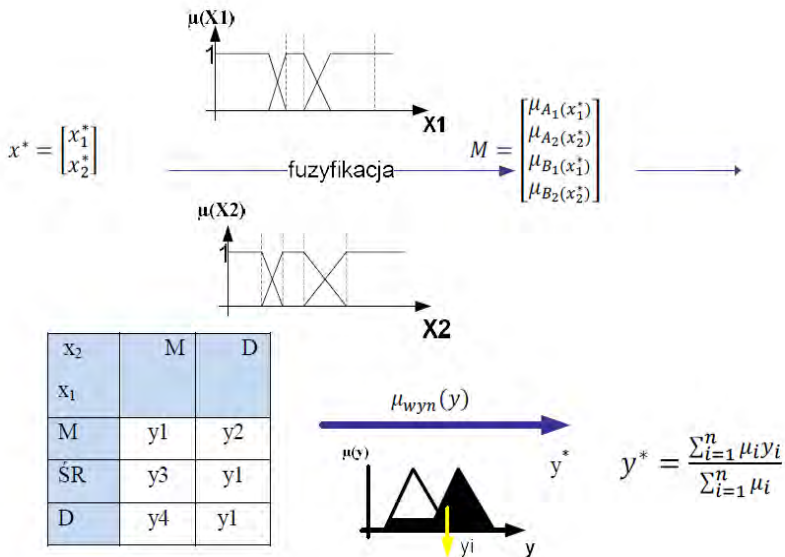
W analizowanym przypadku do realizacji operacji połączenia zbiorów I zastosowano agregację przesłanek w regułach z użyciem operatora *PROD*, operacji połączenia zbiorów *LUB* operatora *MAX*, obliczenie stopnia aktywizacji konkluzji poszczególnych reguł przeprowadzono z zastosowaniem operatora implikacji Mamdaniego. Obliczenie wynikowej funkcji przynależności wyjścia odbyło się z wykorzystaniem operatora *MAX*. Przy doborze procedury inferencji opierano się na wskazaniach wynikających z analizy wpływu typu operatora na dokładność modelowania rozmytego przeprowadzonej w [173].

Do bloku defuzyfikacji, którego zadaniem jest obliczenie na podstawie wynikowej funkcji przynależności ostrej wartości wyjścia y^* dla podanych ostrych wejść x_1 oraz x_2 , zastosowano metodę środka ciężkości. Jest to metoda uniwersalna, z racji tego, że wszystkie zaktywizowane funkcje przynależności konkluzji (aktywne reguły) biorą udział w procesie defuzyfikacji. Na rysunku 6.7 przedstawiono schemat powierzchni odwzorowania wejścia x_1 (wynik pomiaru chwilowego wydłużenia złącza), wejścia x_2 (odchylenie wyników określone na etapie prognozowania kolejnych wartości szeregu czasowego) i wyjścia y (proponowana reakcja operatora) dla tak opracowanego modelu.



Rys. 6.7 – Powierzchnia odwzorowania wejścia x_1, x_2 / wyjście y modelu

Rysunek 6.8 przedstawia ogólny schemat opracowanego modelu rozmytego, a rysunek 6.9 prezentuje schemat przebiegu obliczeń wyjścia y^* opracowanego modelu rozmytego dla przykładowych wartości wejść x_1 oraz x_2 .

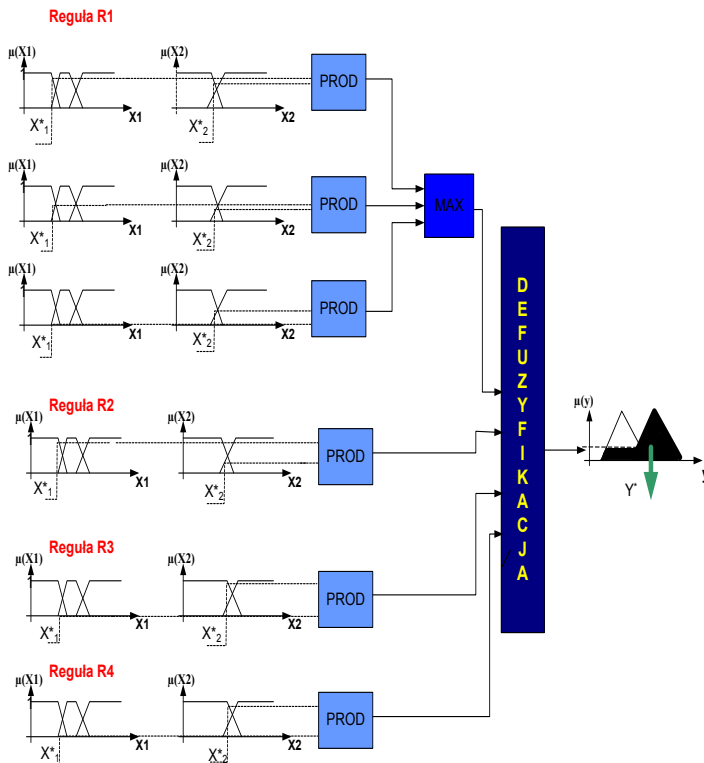


Rys. 6.8 – Schemat sposobu działania opracowanego modelu rozmytego

Tak działający system ekspertowy w układzie diagnostyki stanu połączeń klejowych taśmy przenośnikowej pracującej w dowolnie rozbudowanym systemie transportowym, z powiązaniem z klasycznym działaniem typowych systemów dyspozytorskich może być również określony, jako system ekspertowy bazujący na rozmytej ocenie residuów, w którym modelem analizowanego procesu jest model prognostyczny szeregu czasowego przetwarzający chwilowe wartości charakteryzujących obiekt parametrów.

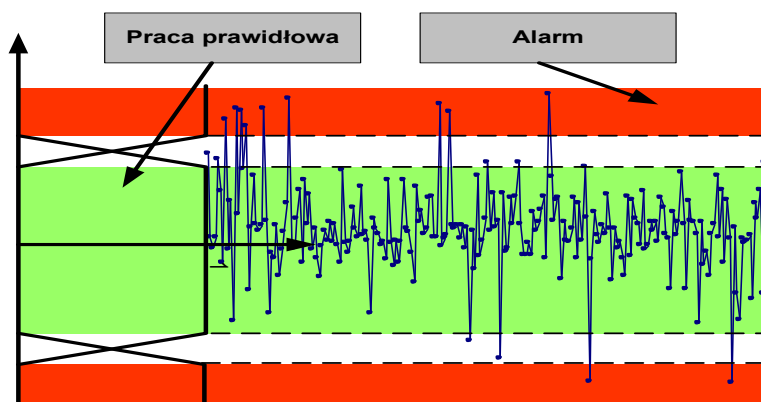
Natomiast ocena residuów odzwierciedlających różnicę pomiędzy zachowaniem się obiektu (jego analizowanego parametru), a zachowaniem określonym przez model, w tym przypadku prognostyczny - realizowana jest przez system oparty na logice rozmytej (rys. 6.9).

System ekspertowy pełni dla operatora często rozbudowanego i złożonego systemu transportowego narzędzie doradcze, wskazujące potencjalne działania, korygujące błędne wskazania systemów zabezpieczających oraz eliminujące nadmiar nieprzetworzonej informacji generowanej przez układ monitorujący.



Rys. 6.9 - Schemat przebiegu obliczeń wyjścia y^* opracowanego modelu rozmytego dla przykładowych wartości wejść x_1^* oraz x_2^*

Jego działanie ma zatem za zadanie jedynie wspomaganie procesu obserwacji badanego obiektu z wykorzystaniem opracowanego komputerowego systemu pomiarowego, wspomaganie procesu gromadzenia i przetwarzania danych pomiarowych oraz wspomaganie wnioskowania (rys. 6.10). Ostateczna decyzja na temat podjętego działania stosownie do wskazań systemu ekspertowego zawsze będzie należała do operatora pojedynczego urządzenia lub też dyspozytora całego systemu. Celowym byłoby, zatem zaproponowanie stosownego rozwiązania, które z wykorzystaniem posiadanej wiedzy na temat analizowanego systemu transportu taśmowego oraz wyników jego modelowania z wykorzystaniem logiki rozmytej, wsparte wiedzą na temat sterowania obiektów technicznych pozwalałoby na wyeliminowanie operatora lub też ograniczenie jego roli do czynności nadzorująco-kontrolnych dzięki skutecznemu działaniu systemu sterowania przenośnikami taśmowymi.



Rys. 6.10 – Działanie systemu ekspertowego na bazie rozmytej oceny residuów

Naturalną konsekwencją zrealizowanych prac powinno być zatem rozbudowanie skonstruowanego systemu pomiarowo-doradczego o moduł sterujący – diagnozujący, interpretujący, przewidujący przyszłe stany, generujący sygnały o charakterze naprawczym oraz analizujący ich skuteczność w układzie z informacyjnym sprzężeniem zwrotnym. Z racji opisanych wcześniej niejednoznaczności i niepewnej oraz nieprecyzyjnej wiedzy dotyczącej stanu złączy taśm przenośnikowych oraz innych parametrów istotnych dla działania takiego systemu sterowania, najlepszym i najbardziej skutecznym rozwiązaniem będzie w tym przypadku ponownie logika rozmyta.

6.2. Koncepcja inteligentnego modułu sterującego z wykorzystaniem logiki rozmytej

Przenośnik taśmowy to urządzenie w ciągłym ruchu, eksploatowane w wielu przypadkach niemal przez całą dobę, za wyjątkiem jedynie krótkich przerw konserwacyjno-remontowych. Eksploatujący przenośnikowe systemy transportowe są zatem zainteresowani ich stałą i bezawaryjną pracą, często pod dużym obciążeniem. Niekorzystną z ekonomicznego punktu widzenia jest zatem analizowana okoliczność długotrwałego wyłączenia przenośnika taśmowego z ruchu w przypadku zaistnienia zerwania taśmy w obszarze złącza. Przeciwdziałanie takim sytuacjom możliwe jest z wykorzystaniem opisywanego we wcześniejszych rozdziałach komputerowego systemu pomiarowo-diagnostycznego wzbogaconego o system ekspertowy. Dzięki na bieżąco wykonywanym pomiarom chwilowej zmiany długości każdego złącza klejowego, dodatkowo z wykorzystaniem predykcyjnej analizy rejestrowanych danych jesteśmy w stanie oceniać bieżący stan złącza oraz prognozować moment zbliżania się potencjalnego zerwania taśmy w obszarze identyfikowanego złącza. Reakcja operatora systemu w takim przypadku to chwilowe zatrzymanie taśmy w celu czasowego jej wzmocnienia oraz doprowadzenia w niezniszczonym stanie do najbliższej zmiany remontowej, zmiana parametrów pracy przenośnika (jego obciążenia) w celu zapewnienia jego niezakłóconej pracy do czasu możliwego wykonania niezbędnej naprawy złącza lub też alarmowe zatrzymanie przenośnika i wykonanie nowego połączenia. Ostatnia alternatywna decyzja wiązać się będzie z niekorzystnym i nieekonomicznym, wielogodzinnym zatrzymaniem pracy przenośnikowego systemu transportu w celu wykonania nowego złącza w miejscu uszkodzonego. Najkorzystniejszym rozwiązaniem byłoby czasowe zmniejszenie obciążenia przenośnika, co wprawdzie skutkowałoby obniżeniem jego wydajności, ale też gwarantowałoby niezawodną pracę nawet z częściowo uszkodzonym złączem do czasu wykonywania planowych prac konserwacyjno-remontowych. Innymi słowy niezbędne jest sterowanie wielkościami charakteryzującymi wydajność i obciążenie przenośnika (prędkość taśmy, powierzchnia przekroju poprzecznego nosiwa na taśmie) przy jednoczesnej obserwacji wpływu sterowania na chwilowe wartości wydłużenia newralgicznego złącza znajdującego się w stanie bliskim zerwania. Zadanie takie jest dość trudne do realizacji z zastosowaniem standardowych metod sterowania, chociażby z racji tego, że ilość transportowanego materiału na taśmie przenośnikowej jest trudna do precyzyjnego określenia, również jeśli odnoszona w przybliżeniu do chwilowej wartości przekroju poprzecznego nosiwa na taśmie. Ta wielkość, bowiem zmienia się w czasie, a jej zmiany są często losowe. Również sam transportowany materiał

z reguły jest niejednorodny i zawiera na przykład bryły o zmiennej wielkości, różnej gęstości itp. Rozwiązaniem będzie zatem sterowanie rozmyte w układzie zamkniętym, jako system ze sprzężeniem zwrotnym, w którym aktualne decyzje podejmowane są na podstawie obserwacji skutków decyzji podjętych wcześniej.

Obiektem sterowania będzie w tym przypadku przenośnik taśmowy, z odpowiednio zdefiniowanymi charakteryzującymi go wielkościami – sterowanymi, sterującymi i zakłóceniami. Zgodnie z definicją [32], przez wielkość sterowaną rozumiemy wielkość, dla której precyzuje się cel sterowania (wymagania). W analizowanym przypadku wielkością tą będzie chwilowe wydłużenie względne każdego ze złączy znajdujących się na trasie przenośnika taśmowego. Będziemy więc mieli w tym przypadku system sterowania ekstremalnego obiektu o jednym wyjściu, dla którego celem sterowania jest doprowadzenie wyjścia do wartości ekstremalnej, tj. najmniejszej z możliwych w danych okolicznościach i mniejszych od wartości bliskiej awarii oraz utrzymywanie wyjścia możliwie blisko tej wartości przy zmieniających się zakłóceniach i wielkościach sterujących.

Wielkości zakłócające w przypadku sterowania zmianą chwilowej wartości wydłużenia złącza taśmy przenośnikowej to głównie charakteryzujące obiekt parametry jakościowe – czas pracy złącza (jego wiek), jakość wykonania złącza oraz warunki jego wcześniejszej pracy, będące w tym przypadku zmiennymi rozmytymi. Innymi słowy celem sterowania w tym przypadku jest utrzymywanie chwilowej wartości wydłużenia względnego złącza określonego analogicznie, jak w przypadku ekspertowego systemu diagnostycznego, jako małe, średnie i duże, na jak najniższym poziomie wartości, możliwe maksymalnie niższym od wartości alarmowej dla zapewnienia bezpieczeństwa jego działania. W tym celu dysponując wiedzą, o jakości wykonania złącza oraz czasie i warunkach wcześniejszej jego pracy, system sterujący ma za zadanie odpowiednie dla celu sterowania ustalenie wartości wielkości sterujących, czyli prędkości taśmy oraz masy transportowanego materiału na taśmie przenośnikowej (lub też obciążenia nosiwem 1m długości przenośnika).

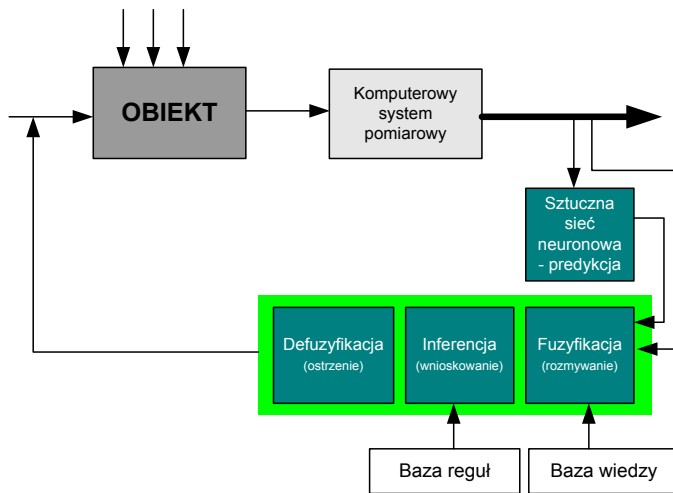
A zatem podsumowując analizę systemową obiektu sterowania możemy stwierdzić, że cel sterowania to zwiększenie żywotności złączy odcinków taśmy uzyskiwane poprzez ograniczenie, czy wręcz przeciwdziałanie wystąpieniu nadmiernego ich obciążenia skutkującego wydłużeniem przekraczającym wytrzymałość połączenia na zrywanie. Jako wyjście systemu y przyjmiemy, zatem chwilowe wydłużenie względne złącza. Wielkości wejściowe systemu $\{x_{ij}\}$ to chwilowa wartość prędkości taśmy, przyspieszenie taśmy, masa transportowanego materiału, a zakłócenia $\{z_{ij}\}$ to czas pracy złącza (jego wiek) oraz jego jakość wykonania i dotychczasowe warunki eksploatacji. Uzyskamy w ten sposób system opisywany przez sześć różnego typu zmiennych wejściowych (ściśle oraz rozmyte) oraz jedną zmienną wyjściową, z których dwie zmienne wejściowe (prędkość taśmy i masa transportowanego materiału) to wielkości sterowane. W przypadku przenośnika taśmowego, jako obiektu sterowania przy

założeniu dążenia do zwiększenia żywotności taśmy, model obiektu, który możemy zbudować będzie opierał się na przetwarzaniu precyzyjnych pomiarów uzyskiwanych z układu monitorującego, uzupełnionych o jakościową ocenę pochodzącą z zasobu wiedzy ekspertów.

Dla najnowszych osiągnięć nauki problem taki nie jest nierozwiązywalny. Jak stwierdza bowiem Kacprzyk [96], nawet w przypadku skomplikowanych procesów, których modele nie są znane lub ich wyznaczenie jest zbyt trudne lub też zbyt kosztowne, można skonstruować regulator automatyczny będący rodzajem systemu ekspertowego, a korzystający jedynie z nieprecyzyjnej wiedzy eksperta. Przy rozwiązywaniu takiego problemu możemy przyjąć przykładowo deskryptywne lub preskryptywne podejście do sterowania z wykorzystaniem logiki rozmytej. W pierwszym przypadku nie opieramy się na modelu procesu, jedynie w sposób jawny opisujemy, jak sterować obiektem. Przyjmując natomiast podejście preskryptywne naszym zadaniem jest określenie najlepszego sterowania przy założeniu wiedzy o zachowaniu analizowanego obiektu oraz celach, które należy osiągnąć i przy ograniczeniach, które należy spełnić. Dysponując wiedzą o charakterze ilościowym, jak i jakościowym opisującą cel, sposób jego osiągnięcia oraz ograniczenia dotyczące przenośnika taśmowego rozumianego jako obiekt sterowania w aspekcie zwiększenia żywotności jego złączy, możemy uznać preskryptywne podejście do problemu za jak najbardziej odpowiednie. Preskryptywne podejście do zagadnienia zwiększenia żywotności złączy taśm przenośnikowych w oparciu model rozmyty obiektu oznacza między innymi określenie precyzyjne i rozmyte elementów otoczenia obiektu, określenie ograniczeń rozmytych itp., jak i znalezienie optymalnych rozwiązań. W tradycyjnym podejściu do sterowania rozmytego rozmytość jest efektem zastosowania opisowych reguł sterowania. Podejście preskryptywne oznacza natomiast odpowiednie określenie otoczenia, w którym przebiegać ma proces sterowania, rozumianego jako zdefiniowanie rozmytych ograniczeń, rozmytych celów oraz określeniu dynamiki przejść stanów układu sterowanego opisanych jedynie zmiennymi lingwistycznymi [96]. Poruszać się, zatem będziemy w obszarze logiki rozmytej, rozumianej w oparciu o jedną z wcześniejszych definicji [83], jako podstawę wnioskowania bazującego na niejednoznacznych i nieprecyzyjnych stwierdzeniach.

W analizowanym przypadku możemy opierać się na wykorzystanym przy opracowaniu ekspertowego systemu diagnostycznego scenariuszu postępowania, polegającym na wykonaniu modelu obiektu o strukturze określonej dzięki posiadanej wiedzy eksperta oraz parametrach modelu uzyskanych dzięki rejestrowanym danym eksperymentalnym, pochodzącym z pomiarów realizowanych przez komputerowy system pomiarowy układu monitorującego. Zgodnie z definicją [105], metody detekcji uszkodzeń można podzielić na metody wykorzystujące związki między zmiennymi procesowymi oraz metody bazujące na kontroli parametrów zmiennych procesowych. W przypadku komputerowego systemu pomiarowego zmian długości złączy

taśm przenośnikowych mamy do czynienia z wykrywaniem symptomów uszkodzeń na podstawie pomiarów, analizy oraz oceny przebiegu jednej zmiennej procesowej, kiedy to w sposób szczególny kontrolowane są założone ograniczenia w postaci granicy alarmowej określające przekroczenia maksymalnego, chwilowego bezpiecznego wydłużenia złącza. Wadą takiego sposobu diagnozowania jest częsta niejednoznaczność przyczyn występowania zmian wartości parametrów sygnałów, wynikająca z charakteru pracy przenośnika taśmowego, jego zmiennego obciążenia, występowania chwilowych przyspieszeń, gwałtownego hamowania itp.



Rys. 6.11 – Schemat koncepcji sterowania rozmytego pracą przenośnika taśmowego

Najważniejszym etapem projektowania systemu sterowania jest opracowanie algorytmu sterowania, który z kolei jest podstawą opracowania koncepcji komputerowego programu sterującego. Przy projektowaniu typowego regulatora rozmytego typu FLC (ang. Fuzzy Logic Controller), występują dwa istotne problemy [203] – wyznaczenie etykiet wartości lingwistycznych, funkcji przynależności i odpowiednich zbiorów rozmytych oraz odpowiednie sformułowanie bazy reguł. Pierwszy z wymienionych problemów został rozwiązany dzięki opracowaniu koncepcji ekspertowego systemu diagnostycznego analizowanego obiektu. W przypadku konstruowania regulatora rozmytego możemy opierać się na wcześniej zdefiniowanych i sprawdzonych elementach. Pośrednio, korzystając dodatkowo z wiedzy eksperta (baza wiedzy), w łatwy sposób możemy zdefiniować bazę reguł określających związek pomiędzy zmiennymi wejściowymi i zmienną

wyjściową. Regulator FLC jest bowiem projektowany w analogiczny sposób, jak rozmyty system ekspertowy. Przez regulator rozmyty rozumiemy [203] prawo sterowania, które jest opisane przez system o bazie wiedzy zawierający reguły IF-THEN przy nieokreślonych predykatkach i mechanizmie sterowania o logice rozmytej.

W przypadku analizowanego obiektu sterowania baza reguł będzie składała się z następujących przykładowych relacji:

R1: IF (wydłużenie względne = małe) AND (wiek=mały) AND (jakość=wysoka) AND (warunki=dobre) THEN (prędkość=duża) AND (przyspieszenie=zero) AND (masa=duża),

...

Rn: IF (wydłużenie względne=duże) AND (wiek=duży) AND (jakość=niska) AND (warunki=ciężkie) THEN (prędkość=mała) AND (przyspieszenie=małe ujemne) AND (masa=mała).

Tak zdefiniowany kontroler rozmyty (rys. 6.11) stanowi podstawę koncepcji inteligentnego wspomaganie sterowania przonośnika taśmowego, realizując zadanie optymalizacji jego pracy z zastosowaniem sterownika rozmytego.

7. Podsumowanie i wnioski końcowe

Dzięki wysokiej efektywności ekonomicznej transportu opartego na przenośnikach taśmowych, jego elastyczności oraz stosunkowo prostej konstrukcji podstawowych elementów przenośnika zauważamy stały wzrost liczby tego typu systemów będących w eksploatacji. Przenośniki taśmowe w efekcie dużej liczby prowadzonych prac badawczych i wdrożeniowych są obiektami o prostej konstrukcji, ale jednocześnie stają się wyrafinowanymi technologicznie, dzięki zastosowaniu nowoczesnych układów napędowych, systemów sterowania i innych. Ich wykorzystanie w przedsiębiorstwach transportujących duże ilości materiałów na znaczne odległości staje się coraz powszechniejsze, wypierając tym samym inne, mniej wydajne i bardziej kosztowne urządzenia transportowe. Efekt ekonomiczny wynikający z zastosowania systemu transportu przenośnikowego jest jednak w istotnym stopniu stale zagrożony ograniczoną niezawodnością działania części z jego elementów, w tym szczególnie niemożliwych do wyeliminowania lub zastąpienia innymi rozwiązaniami konstrukcyjnymi połączeń odcinków taśmy przenośnikowej, najczęściej wykonywanych metodą klejenia. Taśmy przenośnikowe są zwykle eksploatowane w agresywnych warunkach i przy dużym obciążeniu, w systemach transportowych, które podlegają ciągłym zmianom wynikającym z konieczności ich relokacji lub zmiany trasy. W sytuacji, kiedy na żywotność taśmy i trwałość jej złączy wpływa wiele czynników, o których nie mamy dostatecznej wiedzy, zapewnienie racjonalnej gospodarki taśmami staje się zadaniem trudnym do realizacji.

Zagadnienie trwałości i niezawodności przenośników taśmowych dotyczące taśmy i połączeń jej odcinków – jest jednym z kluczowych problemów eksploatacyjnych systemów transportu ciągłego. Trwałość elementów, w tym najbardziej wpływających na niezawodność przenośnika - połączeń taśmy, można zagwarantować poprzez wdrożenie wyników analiz ich wytrzymałości zarówno statycznej, jak i dynamicznej, czy też wytrzymałości długotrwałej w zależności od cech wytrzymałościowych materiałów złącza oraz jego geometrii z zastosowaniem odpowiednich metod pozyskania i przetwarzania niezbędnej w tym zakresie wiedzy. Wiedzy, która wymaga uporządkowania, usystematyzowania, przeprowadzenia analizy przyczyn i skutków występujących w dostępnej literaturze uproszczeń, ograniczeń oraz braku powtarzalności prezentowanych dotychczas wyników, często realizowanych w niepełnym zakresie z racji niedostępności odpowiednich danych do analizy, czy też znacznej czasochłonności oraz wysokiego kosztu ich pozyskania. Niezbędnym zatem było nieco inne spojrzenie na zagadnienie zapewnienia trwałości i niezawodności elementów przenośników taśmowych, zwłaszcza w aspekcie problematyki inżynierii wiedzy. Wyzwaniem badawczym w tym

przypadku było również podjęcie próby rozwiązania istniejących w tym zakresie problemów, wykorzystując do tego celu najnowsze metody i techniki komputerowego wspomagania prac inżynierskich o charakterze analityczno-projektowym. W warunkach przemysłowych natomiast zastosowanie proponowanego kompleksowego systemu diagnostycznego oraz doradczego w układzie zintegrowanym jest dodatkowym gwarantem zapewnienia odpowiedniej trwałości elementów przenośnika taśmowego oraz jego niezawodności bez względu na czas, miejsce i warunki pracy oraz liczbę przenośników w systemie transportowym.

Opisana w pracy konstrukcja komputerowego systemu monitorującego, wzbogacona o inteligentne moduły ekspertowe i sterujące stanowi istotny krok w kierunku zapewnienia odpowiednio wysokiej niezawodności złączy taśmy przenośnikowej. Rejestrowane i przetwarzane dane pozwalają na podejmowanie decyzji o wymianie lub naprawie złącza w optymalnym momencie, unikając tym samym awarii lub przedterminowej wymiany. Analizowane rozwiązanie konstrukcyjne bazujące na najnowocześniejszych systemach komputerowych, w tym działające w oparciu o metody i techniki inteligentne – sztuczne sieci neuronowe oraz elementy logiki rozmytej, stanowi jednocześnie istotną, praktyczną realizację wskazań, co do kierunków rozwoju przemysłowych systemów diagnostycznych w układach pełnego zautomatyzowania. Pozwala jednocześnie na skuteczne wyeliminowanie zagrożenia nieprzewidzianym zerwaniem taśmy w obszarze złącza, stanowiąc rozwiązanie uniwersalne i elastyczne w swojej konstrukcji oraz charakterze gromadzonych danych pomiarowych, które przy zastosowaniu metod klasycznych oraz narzędzi inteligentnych pozwala na praktyczne wykorzystanie teorii systemów ekspertowych w dowolnym, co do celu i przeznaczenia przetwarzaniu danych i ich analizie. Komputerowe systemy monitorowania, zarządzania i sterowania z elementami ekspertowymi należą aktualnie do najważniejszych rodzajów systemów informatycznych [24, 32, 45, 130, 171, 178, 198], których rozwijanie w ujęciu praktycznych aplikacji przemysłowych jest jak najbardziej pożądane i wskazane. Szczególnie z racji dużej rozbieżności pomiędzy wysoko zaawansowanym stopniem rozwoju teorii systemów inteligentnych, a ograniczoną liczbą ich praktycznych zastosowań opracowanych na potrzeby szybko rozwijającego się przemysłu wykorzystującego powszechnie systemy informatyczne w układach pełnej automatyzacji. Dzięki wynikom przeprowadzonej analizy oraz przy wykorzystaniu opisywanych w pracy systemów można uznać, że w znacznym stopniu zwiększony został zasób dostępnej wiedzy w zakresie wykorzystania metod diagnostyki technicznej w przypadku przenośników taśmowych oraz bazujących na nich systemów transportowych.

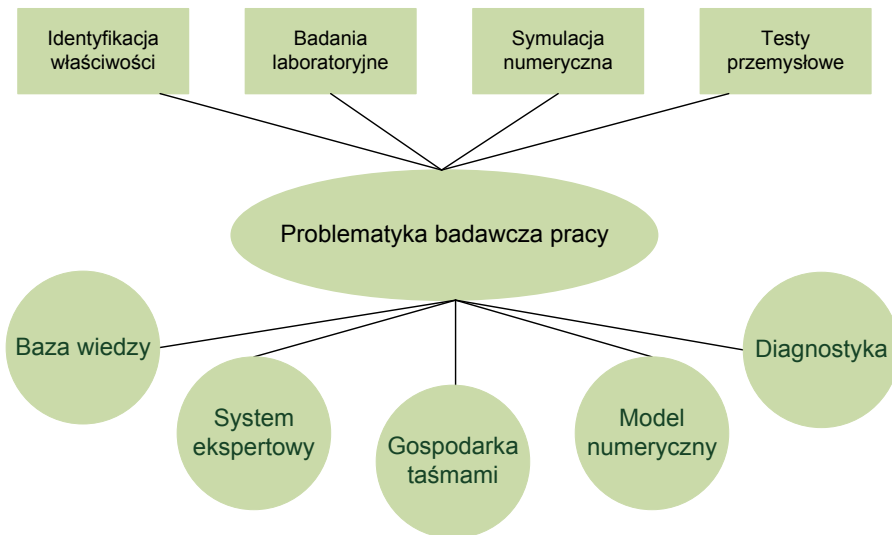
Analizowane w pracy inteligentne informatyczne systemy monitorująco-diagnostyczne z możliwością predykcji oraz bazujące na nich systemy sterujące są uznawane za jeden z ważniejszych obszarów przemysłowych zastosowań

informatyki. Powiązanie ich ze sterowaniem zgodnie ze stwierdzeniem Bubnickiego [32] dostarcza metod i technik niezbędnych do racjonalnego wykorzystania komputerowych zasobów sprzętowych i programowych w przemysłowych systemach wspomaganie podejmowania decyzji. Zaproponowane rozwiązania w sposób zaawansowany oraz skuteczny z racji przemysłowych potrzeb aplikacyjnych łączą zatem zagadnienia diagnostyki komputerowej ze sterowaniem z wykorzystaniem informatycznych metod inżynierii wiedzy.

W pracy wskazano na potwierdzoną testami w warunkach przemysłowych możliwość skutecznego wpływu na trwałość i niezawodność przenośnikowych systemów transportowych dzięki zastosowaniu informatycznego systemu monitorowania stanu złączy taśm przenośnikowych ze wspomaganie inteligentnymi metodami przetwarzania gromadzonych danych pomiarowych. Zastosowanie tych samych technik inteligentnych w dodatkowym module sterującym zapewnia jednocześnie efektywne, w pełni zautomatyzowane diagnozowanie oraz zabezpieczanie przed wystąpieniem uszkodzeń w czasie rzeczywistym. Dodatkowo – opracowany model typowego połączenia klejowego z zastosowaniem metody elementów skończonych, pozwala na zweryfikowanie wyników prowadzonych prac badawczych oraz skuteczne modelowanie optymalizacyjne geometrii połączeń tego typu dla różnych taśm przenośnikowych oraz ich elementów budowy o zróżnicowanych właściwościach wytrzymałościowych. Opracowany i zweryfikowany zaawansowany model symulacyjny umożliwia w tym przypadku kompleksowe podejście do badania elementów systemu transportu, pozwala bowiem na łączenie różnych metod i technik modelowania oraz pozyskania i weryfikacji wiedzy. W porównaniu z metodami analitycznymi umożliwia to badanie systemów i ich cech w złożonych sytuacjach, jakie są spotykane w rzeczywistych warunkach przemysłowych. Takie spojrzenie na problem nieprzewidzianego zerwania taśmy przenośnikowej w obszarze złącza, dzięki jego kompleksowości gwarantuje wysoką niezawodność użytkowanych przenośników taśmowych oraz bazujących na nich systemów transportu wewnątrzzakładowego. Gromadzone i w odpowiedni sposób przetwarzane dane pomiarowe pochodzące z opracowanego systemu diagnostyczno-monitorującego dają możliwość kontynuacji prezentowanych prac badawczych, szczególnie w aspekcie dalszego rozwoju i aplikacji metod i technik inteligentnych w przemysłowych systemach o pełnej automatyzacji.

Prezentowane wieloletnie i wielowątkowe prace badawcze (rys. 7.1) prowadzone w celu kompleksowej analizy problematyki trwałości złączy taśm przenośnikowych, opierały się na wykorzystaniu zróżnicowanych narzędzi informatycznych, a finalne rozwiązanie zakłada jego wykorzystanie w koncepcji komputerowego wspomaganie gospodarki taśmami w oparciu o narzędzia inteligentne. Poszczególne etapy przeprowadzonych analiz i prac badawczych oraz uzyskane w ich wyniku efekty lub wnioski obejmowały:

- Analizę stanu wiedzy w zakresie konstrukcji oraz metod łączenia taśm przenośnikowych z przeglądem aktualnej problematyki eksploatacyjnej i badawczej. Wykazano potwierdzone badaniami laboratoryjnymi rozbieżności pomiędzy wartościami teoretycznymi i rzeczywistymi wytrzymałości złączy taśm na zrywanie. Opisano podejmowane dotychczas prace badawcze zmierzające do ograniczenia zużycia się taśm i jej elementów. Przeanalizowano przyczyny i skutki odmiennego sposobu podejścia do analizowanego zagadnienia, czy też stosowanych uproszczeń w trakcie badań. Wskazano na niewielki stopień wykorzystania metod diagnostyki technicznej w przypadku przenośników taśmowych i bazujących na nich systemów transportu, a na podstawie analizy wad i zalet stosowanych obecnie typowych systemów diagnostycznych zasugerowano potencjalne potrzeby rozwoju tego typu metod i systemów w przenośnikowych układach transportowych.



Rys. 7.1 – Zakres tematyczny problematyki badawczej pracy

- Zbudowanie bazy wiedzy w zakresie użytkowych właściwości taśm przenośnikowych w oparciu o szczegółowo zaprojektowany scenariusz postępowania, którego celem było uporządkowanie, usystematyzowanie oraz uzupełnienie wiedzy na temat analizowanego obiektu, charakteryzujących go stanów, wartości cech opisujących zarówno wejścia, jak i wyjścia, co jest warunkiem niezbędnym dla przeprowadzenia poprawnego wniosku diagnostycznego. Gromadzenie wiedzy obejmowało badania laboratoryjne cech eksploatacyjnych taśm i ich złączy wykonanych różnymi metodami łączenia oraz na różnym etapie ich użytkowania, również w warunkach przemysłowych. Wyniki badań laboratoryjnych wykorzystano do weryfikacji opracowanego modelu numerycznego typowego złącza klejowego taśmy przenośnikowej. Budowę modelu numerycznego opracowanego w oparciu o metodę elementów skończonych, poprzedzono próbami wytrzymałościowymi w celu poprawnej identyfikacji właściwości wytrzymałościowych materiałów pochodzenia kauczukowego stanowiących elementy składowe złącza. Opisano przyczyny dotychczas popełnianych błędów w trakcie przygotowywania charakterystyk materiałów na potrzeby symulacji numerycznej oraz opracowano poprawną metodę realizacji prób wytrzymałościowych. Wykorzystując zgromadzone dane oraz wykonany model numeryczny złącza przeprowadzono symulację stanu naprężenia i odkształcenia w obszarze złącza umożliwiającą szczegółową analizę procesów zachodzących w spoinie w ujęciu zmęczeniowym. Model numeryczny ma charakter uniwersalny i może być wykorzystany do prac analitycznych i optymalizacyjnych różnych konstrukcji złączy wykonywanych z materiałów o zróżnicowanych właściwościach wytrzymałościowych. Przeprowadzono również analizę wpływu grubości warstwy kleju na wytrzymałość połączenia, jako przykład możliwości wykorzystania opracowanego modelu do celów optymalizacji geometrii połączenia. Zrealizowanym celem analizy numerycznej była bowiem ocena możliwości wykorzystania opracowanego modelu połączenia do prognozowania trwałości i wytrzymałości złącza oraz jego zastosowania na etapie konstruowania połączenia.

- W oparciu o wyniki przeprowadzonych badań laboratoryjnych oraz symulacji numerycznej postawiono tezę dotyczącą możliwości monitorowania stanu złączy taśm przenośnikowych oraz odcinków taśmy pomiędzy nimi. Opracowano projekt oraz wykonano komputerowy system monitorujący, którego skuteczność zweryfikowano na etapie prób przemysłowych przeprowadzonych w warunkach dołowych kopalni L.W. Bogdanka S.A. Analizując wyniki pomiarów wskazano na potrzebę budowy kompleksowego, zintegrowanego komputerowo systemu nadzoru i sterowania transportu taśmowego z wykorzystaniem numerycznego wspomagania podejmowania decyzji.
- Z uwagi na wskazaną konieczność rozbudowy układu monitorującego o inteligentny system doradczy diagnostyki złączy taśm przenośnikowych, w oparciu o teorię zbiorów rozmytych opracowano system ekspertowy bazujący na modelu rozmytym obiektu, określono funkcje przynależności zmiennych wejściowych, określono bazę reguł oraz mechanizm inferencyjny, określono również wynikową postać funkcji przynależności zmiennej wyjściowej. Funkcje przynależności do zbiorów rozmytych wejść zostały określone na podstawie wiedzy zgromadzonej w trakcie badań laboratoryjnych oraz prób przemysłowych analizy zachowania się złączy klejowych w czasie ich obciążenia. Opracowano również koncepcję sterowania rozmytego pracą przenośnika taśmowego oraz zaproponowano bazę reguł dla przypadku analizowanego obiektu.

Wyniki przeprowadzonej analizy, badań laboratoryjnych, testów przemysłowych oraz symulacji numerycznych realizowanych w celu zwiększenia trwałości i niezawodności połączeń taśm przenośnikowych pozwalają na stwierdzenie, że cel rozprawy został osiągnięty. Przeprowadzone prace badawcze oraz zaprezentowane wyniki ich realizacji stanowią wkład w rozwój systemów diagnostyki transportu taśmowego. Weryfikacja opracowanego modelu numerycznego oraz pomiary i testy w warunkach przemysłowych potwierdzają słuszność przyjętych założeń oraz celów realizacji przeprowadzonych prac badawczych. Ich wyniki mają wpływ na poprawę efektywności systemu transportu taśmowego w efekcie ekonomicznej maksymalizacji wyników przy jednoczesnej minimalizacji

nakładów. Nie wyczerpują one jednak wszystkich analizowanych problemów zapewnienia optymalnej realizacji zadań funkcjonalnych analizowanego obiektu. Szczególnie istotnym jest dalsze kontynuowanie prac nad praktyczną realizacją kompleksowego, ujednoczonego systemu inteligentnej diagnostyki transportu taśmowego oraz ekspertowego systemu wspomaganie gospodarki taśmami w oparciu o dane pomiarowe rejestrowane przez opracowany system monitorujący.

Literatura

1. Ablameyko S., Goras L., Gori M., Piuri V. – „*Neural networks for instrumentation, measurement and related industrial applications*”. NATO Science Series. Series III: Computer and System Sciences – Vol. 185. IOS Press, Amsterdam 2003.
2. Ageorges C., Ye L. – “*Fusion bonding of polymer composites*”. Series: Engineering Materials and Processes. Springer Verlag 2002, XVIII.
3. Altidis P., Warner B. – “*Analyzing hyperelastic materials – some practical considerations*”. Midwest ANSYS Users Group, Impact Engineering Solutions, 2004.
4. Amara Venkata Subba Rao, Dilip Kumar Pratihari – “*Fuzzy logic-based system to predict the result of finite element analysis*”. Knowledge-Based Systems 20 (1) (2007), s. 37-50.
5. Antoniak J. – “*Urządzenia i systemy transportu podziemnego w kopalniach*”. Wydawnictwo Śląsk, Katowice 1990.
6. Antoniak J. – „*Górnictwo przemożniki taśmowe do dostawy urobku w pochylniach*”. Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej nr 83, Seria Konferencje nr 22 – „Podstawowe problemy transportu kopalnianego”. XII Szkoła Jesienna „Monitorowanie, diagnostyka i badania urządzeń transportu taśmowego”, Świeradów Zdrój, 23-26 września 1998. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1998, s. 3-14.
7. Antoniak J. – „*Monitorowanie, kontrola i sterowanie procesów transportowych w górnictwie podziemnym*”. Maszyny Dźwigowo-Transportowe, Detrans Bytom, nr 1/2001.
8. Antoniak J. – „*Przenożniki taśmowe w górnictwie podziemnym i odkrywkowym*”. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2007.
9. Antoniak J. – „*Przenożniki taśmowe. Wprowadzenie do teorii i obliczenia*”. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2004.
10. Antoniak J. – „*Rozwój przemożników taśmowych i ich systemów do roku 2010 odpowiadających zwiększonej koncentracji wydobywania*”. Mechanizacja i Automatyzacja, nr 1/2003.
11. Antoniak J., Lutyński A. – „*Światowe osiągnięcia FTT Stomil Wolbrom S.A. w wyposażaniu przemożników górnictwa odkrywkowego i podziemnego w nowoczesne taśmy wysokiej jakości*”. Materiały XVI Międzynarodowego Sympozjum Pt. „100 lat w służbie polskiego przemysłu wydobywczego”. FTT Stomil Wolbrom S.A., Zakopane 2008, s. 141-166.

12. Antsaklis P. J. – “*Intelligent control*”. Encyclopedia of Electrical and Electronic Engineering, John Wiley & Sons Inc. 1997.
13. Attoui A. – “*Real-time and multi-agent systems*”. Springer, London 2000.
14. *Badania właściwości wytrzymałościowych złącza klejonego ze wzmocnieniem mechanicznym*. Sprawozdanie nr LTT/02/05 Laboratorium Transportu Taśmowego Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej (materiały niepublikowane).
15. *Badania wytrzymałości i wydłużalności połączeń taśm tkaninowo-gumowych*. Sprawozdanie nr Z-4/04/04 Laboratorium Transportu Taśmowego Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej (materiały niepublikowane).
16. Bąk R., Burczyński T. – “*Wytrzymałość materiałów z elementami ujęcia komputerowego*”. WNT, Warszawa 2001.
17. Baldan A. – „*Review: Adhesively-bonded joint in metallic alloys, polymers and composite materials. Mechanical and environmental durability performance*”. Journal of Materials Science, 39 (2004), s. 4729-4797.
18. Banaszak A., Laska Z. – „*Trzydziestoletnie doświadczenia w eksploatacji taśm przenośnikowych produkcji FTT Stomil Wolbrom w O. ZG Rudna*”. Materiały XVI Międzynarodowego Sympozjum pt. „100 lat w służbie polskiego przemysłu wydobywczego”. FTT Stomil Wolbrom S.A., Zakopane 2008, s. 7-20.
19. Banaszak A., Laska Z., Zajac A. – „*Doświadczenia w eksploatacji taśm przenośnikowych w O. ZG Rudna. Charakterystyka uszkodzeń taśm i analiza przyczyn ich powstawania*”. XV Międzynarodowe Sympozjum FTT Stomil Wolbrom S.A. „Nowe rozwiązania w transporcie przenośnikami taśmowymi”. Zakopane 2007, s. 17-36.
20. Bartelmus W. – „*Monitorowanie, diagnostyka, badania przenośników taśmowych*”. Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej nr 83, Seria Konferencje nr 22 – „Podstawowe problemy transportu kopalnianego”. XII Szkoła Jesienna „Monitorowanie, diagnostyka i badania urządzeń transportu taśmowego”, Świeradów Zdrój, 23-26 września 1998. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1998, s.23-32.
21. Będziński R., Hardygóra M., Madziarz M., Modzel P. – „*Zastosowanie metod elastooptycznych do badań połączeń tkaninowych wieloprzekładowych taśm przenośnikowych*”. Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej nr 83, Seria: Konferencje nr 22. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1998, s. 33-40.

22. Beevers A., Steidler S. M., Durodola J., Coackley M. – „*Analysis of stiffness of adhesive joints in car bodies*”. *Journal of Materials Processing Technology*, 118 (2001), s. 96-101.
23. Bernaciak M. – „*Klejenie taśmociągów i wykładzin gumowych z użyciem kleju PKT*”. www.ntr.com.pl.
24. Berthold M., Hand D. – „*Intelligent data analysis*”. Springer-Verlag, Berlin 1999.
25. Bilgili E. – „*Modelling mechanical behaviour of continuously graded vulcanized rubbers*”. *Plastics, Rubbers and Composites*, 2004, vol. 33, nr 4, s. 163-169.
26. Błażej R. – „*Analiza sposobu zużycia taśm przenośnikowych w zależności od warunków eksploatacyjnych*”. *Prace Naukowe Instytutu Górnicztwa Politechniki Wrocławskiej Nr 80, Seria Konferencje Nr 20, Wrocław 1996*, s. 39-45.
27. Błażej R. – „*Wpływ właściwości mechanicznych rdzenia taśm przenośnikowych tkaninowo-gumowych na wytrzymałość ich połączeń*”. *Rozprawa doktorska (niepublikowana), Politechnika Wrocławska, Wrocław 2001*.
28. Błażej R., Hardygóra M., Komander H. – „*Wpływ temperatury na trwałość zmęczeniową połączeń taśm przenośnikowych*”. *Górnictwo Odkrywkowe*, nr 4-5/2003, s. 67-71.
29. Błażej R., Hardygóra M., Komander H. – „*Wpływ wybranych parametrów na trwałość zmęczeniową połączeń wieloprzekładkowych taśm przenośnikowych*”. *Transport Przemysłowy*, nr 3 (9)/2002, s. 5-9.
30. Box G. E. P., Jenkins G. M. – „*Analiza szeregów czasowych. Prognozowanie i sterowanie*”. PWN, Warszawa 1983.
31. Brandt S. – „*Analiza danych*”. PWN, Warszawa 1998.
32. Bubnicki Z. – „*Teoria i algorytmy sterowania*”. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2005.
33. Chojnacki A., Muszyński W. – „*Sterowanie przy użyciu sterownika rozmytego na przykładzie sterownika osi robota*”. *IV Krajowa Konferencja Robotyki. Prace Naukowe Instytutu Cybernetyki Technicznej Politechniki Wrocławskiej nr 93, Seria Konferencje nr 40, T.2, Wrocław 1993r*.
34. Cholewa W. – „*Dynamiczne systemy doradcze*”. *Methods of artificial intelligence in mechanics and mechanical engineering*. Gliwice, 2000, s. 37-54.
35. Cholewa W., Kościelny J. M. – „*Diagnostyka procesów i jej podstawowe zadania. [w:] Diagnostyka procesów – modele, metody sztucznej inteligencji, zastosowania*”, Korbicz J., Kościelny J. M., Kowalczyk Z., Cholewa W. (red.), WNT, Warszawa 2002.

36. Ciesielski A. – “*An introduction to rubber technology*”. Rapra Technology Limited Shawbury, 1999.
37. Ciszewski O. – „*Identyfikacja parametrów wpływających na wytrzymałość zmęczeniową wieloprzekładowych taśm przenośnikowych*”. Rozprawa doktorska (niepublikowana), Politechnika Wroclawska, Wrocław 1996.
38. Crocker L. E., Duncan B. C., Urquhart J. M., Hughes R. G., Olusanya A. – “*The application of rubber material models to analyse flexible adhesive joints*”. <http://www.adhesivestoolkit.com>.
39. Curley A. J., Hadavinia H., Kinloch A. J., Taylor A. C. – „*Predicting the service-life of adhesively-bonded joint*”. International Journal of Fracture, 103 (2000), s. 41-69.
40. Czowniuk J. W., Matwijkenko W. A. – “*The rheologic model and the mechanism for adhesive layer constituting in adhesive and adhesive-mechanical joints*”. Technologia i Automatykacja Montażu, Nr 2/1994, s. 35-38.
41. Czowniuk J. W., Matwijkenko W. A. – “*Analytical dependences for determining parameters of adhesive-rivet joints*”. Technologia i Automatykacja Montażu, N4. 2/1994, s. 38-40.
42. Darwish S. M. – “*Analysis of weld-bonded dissimilar materials*”. International Journal of Adhesion & Adhesives, 24 (2004), s. 347-354.
43. de Moura M. F. S. F., Daniaud R., Magalhaes A. G. – “*Simulation of mechanical behaviour of composite bonded joints containing strip defects*”. International Journal of Adhesion and Adhesives, 26 (2006), s. 464-473.
44. De S. K., White J. R. (ed.) – “*Poradnik technologa gumy*”. Instytut Przemysłu gumowego “Stomil”, Piastów 2003.
45. Debenham J. – „*Knowledge Engineering*”. Springer, Berlin 1998.
46. Dębski H., Rudawska A. – „*Analiza rozkładów naprężeń w jednozakładowym połączeniu klejowym*” [w:] „*Analizy numeryczne wybranych zagadnień mechaniki*” pod redakcją T. Niezgody. WAT, Warszawa 2007.
47. Denai M. A., Palis F., Zeghib A. – “*Modeling and control of non-linear systems using soft computing techniques*”. Applied Soft Computing, 7 (2007), pp. 728-738.
48. Desowski A. – „*Poradnik eksploatacji taśm przenośnikowych*”. Zakłady Gumowe Górnictwa, Bytom 1999.
49. Diadiura O. I. – „*Ekspluatacyjna magistralnych lentocznych konwiejerow s primienienijem riezinotkaniewych lent powyszennoj procznosti na szachtach Donieckiego ugolnogo bassiejna*”. Nowe rozwiązania w transporcie przenośnikami taśmowymi.

- XV Międzynarodowe Sympozjum, FTT STOMIL Wolbrom S. A., Zakopane 2007, s. 51-54.
50. Diani J., Brieu M., Gilormini P. – „*Observation and modeling of anisotropic visco-hyperelastic behavior of rubberlike material*”. International Journal of Solids and Structures, 43 (2006), s. 3044-3056.
51. Dimter L. – „*Kleje do tworzyw sztucznych*”. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1971.
52. Dobrzyński W. – „*Zastosowanie logiki rozmytej w interfejsie użytkownika do baz danych*”. Rozprawa doktorska (niepublikowana), IBS PAN, Warszawa 1995.
53. Dorfmann A., Ogden R. W. – „*A constitutive model for the Mullins effect with permanent set in particle-reinforced rubber*”. International Journal of Solids and Structures, Vol. 41, Issue 7, April 2004, s. 1855-1878.
54. Driankov D., Hellendoorn H., Reinfrank M. – „*Wprowadzenie do sterowania rozmytego*”. WNT, Warszawa 1996.
55. Dubiński J., Turek M., Kapiesz J. – „*Istota i zakres scenariuszy rozwoju technologicznego przemysłu wydobywczego węgla kamiennego*”. XVI Szkoła Eksploatacji Podziemnej, Szczyrk 2007.
56. Duncan B. C. – “*Test methods for determining hyperelastic properties of flexible adhesives*”. CMMT (MN)054. Crown, 1999.
57. Ebnesajjad S. – „*Adhesives technology handbook*”. William Andrew Pub., Norwich, NY, USA, 2008.
58. Evans M. P. – „*Conveyor belt engineering for the coal and mineral mining industries*”. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Littleton 1993.
59. Fileti A. M. F., Antunes A. J. B., Silva F. V., Silveira Jr., Pereira J. A. F. R. – “*Experimental investigations on fuzzy logic for process control*”. Control Engineering Practice 15 (2007), s. 1149-1160.
60. Franasik K., Żur T. – “*Mechanizacja podziemnych kopalń rud*”. Wydawnictwo Śląsk, Katowice 1983.
61. Fung T. C., Soh C. K., Gho W. M., Qin F. – „*Ultimate capacity of completely overlapped tubular joints. I – An experimental investigations*”. Journal of Constructional Steel Research 57 (2001), s. 855-880.
62. Gadala M. S. – „*Unified numerical treatment of hyperelastic and rubber-like constitutive laws*”. Communications in Applied Numerical Methods, Vol. 7 (1991), s. 581-587.
63. Gaofeng Wu, Crocombe A. D. – “*Simplified finite element modelling of structural adhesive joints*”. Computers & Structures, Vol. 61, No. 2 (1996), s. 385-391.

64. Garncarz G., Markusik S. – „*Metody określania wydajności a trwałość taśm przenośnikowych*”. Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej Nr 80, Seria Konferencje Nr 20, Wrocław 1996, s. 77-81.
65. Garncarz G., Markusik S. – „*Wpływ czasu eksploatacji taśmy przenośnikowej na zmianę jej niektórych własności mechanicznych*”. Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej nr 83, Seria: Konferencje nr 22. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1998, s. 41-49.
66. Gent A. N. (editor) – “*Engineering with rubber. How to design rubber components*”. Hanser Publisher, Munich, 2001.
67. Gładysiewicz L. – “*Przenośniki taśmowe. Teoria i obliczenia*”. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2003.
68. Gładysiewicz L. – „*Kierunki optymalizacji transportu taśmowego*”. Transport Przemysłowy, 1(31)/2008, s. 5-9.
69. Gładysiewicz L., Kawalec W. – „*Współczynniki oporów ruchu przenośnika rurowego*”. Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej nr 68, Seria Konferencje nr 13, Wrocław 1992.
70. Godzimirski J. – „*Wytrzymałość doraźna konstrukcyjnych połączeń klejowych*”. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2002.
71. Godzimirski J., Kozakiewicz J., Łunarski J., Zielecki W. – „*Konstrukcyjne połączenia klejowe elementów metalowych w budowie maszyn*”. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 1997.
72. Godzimirski J., Roškowicz M. – „*Analiza numeryczna metodą elementów skończonych procesu pełzania spoin połączeń klejowych*”. „Analizy numeryczne wybranych zagadnień mechaniki” pod redakcją T. Niezgody. WAT, Warszawa 2007.
73. Gougen J. A. - „*The logic of inexact concepts*”. Synthese 19 (1969), s. 325-373.
74. Greve L., Andrieux F. – “*Deformation and failure modeling of high strength adhesives for crash simulation*”. International Journal of Fracture, 143 (2007), s. 143-160.
75. Grichin V. S., Chubarov L. A. – “*Experience of less burning conveyors belts exploitation and methods of their connection*”. Mining Machines and Automation, 2 (2002), s. 31-35.
76. Grzegorzek W. – „*Zjawiska trybologiczne w hamulcach górniczych maszyn wyciągowych a sieć neuronowa w analizie*”. TEMAG'99 - Trwałość elementów i węzłów konstrukcyjnych maszyn górniczych. Ustroń 1999.

77. Grzegorzek W., Ścieszka S. – „*Sieć neuronowa w analizie zjawisk trybologicznych*”. TEMAG'99 - Trwałość elementów i węzłów konstrukcyjnych maszyn górniczych. Ustroń 1999.
78. Grzegorzewski P. – „*Wspomaganie decyzji w warunkach niepewności. Metody statystyczne dla nieprecyzyjnych danych*”. Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2006.
79. Gul Apalak Z., Kemal Apalak M., Davies R. – “*Analysis and design of tee joints with double support*”. Int. J. Adhesion and Adhesives, 16 (1996), s. 187-214.
80. Hardygóra M. – „*Zmienność wytrzymałości pojedynczych przekładek w taśmie i jej wpływ na wytrzymałość taśmy*”. Górnictwo Odkrywkowe, nr 5-6, 1997.
81. Hardygóra M., Błażej R., Komander H., Komander G., Konieczka Z., Stolarczyk R. – „*Łączenie taśm przenośnikowych z linkami stalowymi metodą bezolejową*”. Transport Przemysłowy, nr 4 (18)/2004, s. 6-9.
82. Hardygóra M., Komander H. – „*Wytrzymałość połączeń wieloprzekładowych taśm przenośnikowych*”. Przegląd Górniczy, nr 2 (1998), s. 10-13.
83. Harris J. – “*Fuzzy logic applications in engineering science*”. Springer, Dordrecht, the Netherlands, 2006.
84. Hartlieb P. R. – „*Modułowe urządzenia sterujące, dozoruujące i zabezpieczające dla nowoczesnych taśm przenośnikowych i taśmociągów*”. II Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Nowoczesne przenośniki taśmowe dla węglowego górnictwa podziemnego”. Politechnika Śląska. Gliwice – Wisła-Jawornik, 1996.
85. Heimann B., Gerth W., Popp K. – “*Mechatronika. Komponenty, metody, przykłady*”. PWN, Warszawa 2001.
86. Jabłoński R. – “*Zmniejszenie naprężeń wzdłużnych jako jedna z możliwości zwiększenia trwałości taśm przenośnikowych*”. Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej, nr 33, 1979.
87. Jabłoński R. – „*Analiza i synteza urządzeń napinających taśmę w przenośnikach taśmowych dużej mocy*”. Zeszyty Naukowe AGH Kraków nr 1226, Mechanika nr 15, Kraków 1998.
88. Jabłoński R., Furmanik K. – „*Możliwości rozwiązania przenośników o zwiększonej trwałości*”. Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej, nr 45, 1985.
89. Jabłoński R., Kasza P., Kulinowski P., Zarzycki J. – „*Uwagi dotyczące projektowania przenośników taśmowych w upadłych kopalniach węgla kamiennego*”. Nowe rozwiązania w transporcie przenośnikami taśmowymi. XV Międzynarodowe Sympozjum, FTT STOMIL Wolbrom S. A., Zakopane 2007, s. 65-74.

90. Jabłoński R., Kulinowski P. – „*Połączenia mechaniczne typu KRAK-MET i ZTS-2000 dla taśm przenośnikowych z rdzeniem tekstylnym*”. Nowe rozwiązania w transporcie przenośnikami taśmowymi. XV Międzynarodowe Sympozjum, FTT STOMIL Wolbrom S. A., Zakopane 2007, s. 77-88.
91. Jabłoński R., Kulinowski P. – „*Zagadnienia doskonalenia konstrukcji przenośników taśmowych w pracach Katedry Maszyn Górniczych, Przeróbczych i Transportowych AGH*”. Materiały XVI Międzynarodowego Sympozjum pt. „100 lat w służbie polskiego przemysłu wydobywczego”. FTT Stomil Wolbrom S.A., Zakopane 2008, s. 97-114.
92. Jaroszyńska D., Gaczyński R., Felczak B. – „*Metody badań własności fizycznych gumy*”. WNT, Warszawa 1978.
93. Jurdziak L. – „*Metoda określania rozkładu czasu pracy taśmy przenośnikowej i jego wykorzystania do prognozowania wymian taśm*”. Rozprawa doktorska (niepublikowana), Politechnika Wrocławska, Wrocław 1996.
94. Jurdziak L. – „*Zastosowanie zmiennych lingwistycznych do określania stopnia zużycia taśmy – metoda szeregowania taśm przenośnikowych do wymiany*”. Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej Nr 80, Seria Konferencje Nr 20, Wrocław 1996, s. 123-143.
95. Jurek Sz. – „*Nowa technika łączenia taśm przenośnikowych*”. Transport Przemysłowy, nr 2 (120)/2003, s. 22-23.
96. Kacprzyk J. – „*Wieloetapowe sterowanie rozmyte*”. WNT Warszawa 2001.
97. Kasperkiewicz W., Kamiński W., Łopuszek B. – „*Doświadczenia z bezpośredniej odstawy urobku na powierzchnię z wykorzystaniem przenośników taśmowych w warunkach ZG Janina ze szczególnym uwzględnieniem eksploatacji taśm o konstrukcji linkowej*”. Materiały XVI Międzynarodowego Sympozjum pt. „100 lat w służbie polskiego przemysłu wydobywczego”. FTT Stomil Wolbrom S.A., Zakopane 2008, s. 67-82.
98. Knosala R. – „*Zastosowania metod sztucznej inteligencji w inżynierii produkcji*”. WNT Warszawa 2002.
99. Knox E. M., Lafferty S., Cowling M. J., Hashim S. A. – „*Design guidance and structural integrity of bonded connections in GRE pipes*”. Composites: part A 32 (2001), s. 231-241.
100. Koczwarą J. – „*Prezentacja nt. problemów bezpiecznej eksploatacji przenośników taśmowych*”. XV Międzynarodowe Sympozjum „Nowe rozwiązania w transporcie taśmowym”, Zakopane 2007 (materiały niepublikowane).

101. Koczwarą J. – „*Problemy bezpiecznej eksploatacji taśm przenośnikowych*”. Nowe rozwiązania w transporcie przenośnikami taśmowymi. XV Międzynarodowe Sympozjum, FTT STOMIL Wolbrom S. A., Zakopane 2007, s. 89-96.
102. Kołek K., Mitkowski W. – „*Dobór struktury sieci neuronowych w układach sterowania czasu rzeczywistego*”. Informatyka w technologii materiałów. No 1, T.1, 2001, s. 23-34.
103. Konar A. – „*Computational Intelligence – Principles, Techniques and Applications*”. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2005.
104. Korbicz J. – „*Artificial intelligence in technical diagnostics*”. Diagnostyka, Vol. 46, No. 2 (2008), s. 7-16.
105. Korbicz J., Kościelny J. M., Kowalczyk Z., Cholewa W. – „*Diagnostyka procesów. Modele, metody sztucznej inteligencji, zastosowania*”. WNT, Warszawa 2002.
106. Korbicz J., Obuchowicz A., Uciński D. – „*Sztuczne sieci neuronowe. Podstawy i ich zastosowania*”. Akademicka Oficyna Wydawnicza PLJ, Warszawa 1994.
107. Kottner R., Laś V. – „*Fitting material properties of rubber cushioning of tram wheel with composite disk*”. 3rd International PhD Conference on Mechanical Engineering, 7-8.11.2005, Smi – Czech Republic (conference proceedings).
108. Kuczmaszewski J. – „*Technologia śmigłowców. Teoria i technika klejenia*”. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Lubelskiej, Lublin 1990.
109. Kudela J., Grzechnik K., Horst R. – „*15 lat współpracy KWK Piast z FTT Wolbrom w kontekście stosowania nowoczesnego systemu transportu urobku*”. Materiały XVI Międzynarodowego Sympozjum pt. „100 lat w służbie polskiego przemysłu wydobywczego”. FTT Stomil Wolbrom S.A., Zakopane 2008, s. 21-38.
110. Kulinowski P., Laska Z., Zarzycki J. – „*Mobilny system pomiarowy przenośników taśmowych*”. Materiały XVI Międzynarodowego Sympozjum pt. „100 lat w służbie polskiego przemysłu wydobywczego”. FTT Stomil Wolbrom S.A., Zakopane 2008, s. 115-130.
111. Kuzmenko V. I., Kiriaz'ev P. M. – „*Developing high-strength joints for conveyor belts*”. Technical, Technological and Economic Aspects of Thin-Seams Coal Mining. International Mining Forum 2007. Edited by E. J. Sobczyk and J. Kicki. Taylor & Francis Group. London 2007.
112. Kwaśniewski J., Molski Sz., Machula T. – „*Sposób eksploatacyjnego monitorowania i lokalizacji uszkodzeń zbrojonej taśmy przenośnika*”. Biuletyn Urzędu Patentowego RP, Nr 24 (885), 2007, s. 15.

113. Kwiatkowska A. M. – „Systemy wspomagania decyzji”. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2007.
114. Kwon Y., Kwon H., Kim W., Leo S. – „Estimation of rubber material property by successive zooming genetic algorithm”. *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering*, Vol. 1, nr 6 (2007), s. 815-826.
115. Larose D. T. – “Odkrywanie wiedzy z danych. Wprowadzenie do eksploracji danych”. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2006.
116. Leiviska K. – “Industrial applications of soft computing – paper, mineral and metal processing industries”. *Studies in Fuzziness and Soft Computing* Nr 71, Springer-Verlag, Berlin 2002.
117. Lesiak P., Świsulski D. – “Komputerowa technika pomiarowa na przykładach”. Agencja Wydawnicza PAK, Warszawa 2002.
118. Li S., Elbestawi M.A. – “Tool condition monitoring in machining by fuzzy neural networks”. *Dynamics Systems and Control*. ASME DSC 55, s. 1019-1034.
119. Liljedahl C. D. M., Crocombe A. D., Wahab M. A. and Ashcroft I. A. – “Damage modelling of adhesively bonded joints”. *International Journal of Fracture*. Volume 141, Numbers 1-2 / September 2006, s. 147-161.
120. Lion A. – “On the large deformation behavior of reinforced rubber at different temperatures”. *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 45, no. 11/12 (1997), s. 1805-1834.
121. Loctite – worldwide design handbook. Henkel, Monachium 1998.
122. Lutyński A. - „O diagnozowaniu taśm przenośnikowych”. *Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej*, nr 78, 1995.
123. Lutyński A. – „Badania przemysłowe nowoczesnych przenośników taśmowych górnictwa podziemnego”. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2005.
124. Lutyński A. – „Identyfikacja własności mechanicznych tkaninowych taśm przekładkowych eksploatowanych w przenośnikach górniczych”. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej*, nr 1054, Gliwice 1989.
125. Lutyński A. – „Wpływ użytkowania na niektóre własności mechaniczne taśm przenośnikowych”. *Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej*, nr 45, 1985.
126. LW Bogdanka S.A. – materiały wewnętrzne, niepublikowane.
127. Madziarz M. – „Analiza uszkodzeń połączeń taśm przenośnikowych w KWB Turów”. *Prace naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej*, nr 45, Wrocław 1985.
128. Madziarz M. – „Analiza uszkodzeń połączeń taśm przenośnikowych w KWB Turów”. *Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki*

-
- Wrocławskiej Nr 80, Seria Konferencje Nr 20, Wrocław 1996, s. 177-186.
129. Madziarz M. – „*Wpływ konstrukcji i technologii wykonywania połączeń tkaninowych, wieloprzekładowych taśm przenośnikowych na ich wytrzymałość*”. Rozprawa doktorska (niepublikowana), Politechnika Wrocławska, Wrocław 1998.
 130. Maimon O., Rokach L. – „*The data mining and knowledge discovery handbook*”. Springer-Verlag, New York 2005.
 131. Martins P. A. L. S., Natal Jorge R. M., Ferreira A. J. M. – “*A comparative study of several material models for prediction of hyperelastic properties: application to silicone-rubber and soft tissues*”. *Strain*, (2006) 42, s. 135-147.
 132. Masters T. – „*Sieci neuronowe w praktyce. Programowanie w języku C++*”. WNT, Warszawa 1996.
 133. Mazurkiewicz D. – “*Belt failures – tear up profits*”. *Canadian Mining Journal*, No. 6-7/2010, pp.: 30-31.
 134. Mazurkiewicz D. - “*A computer system to monitor the condition of conveyor belt joints*”. *International Carpathian Control Conference ICC'2006*. Roznov pod Radhostem, Czech Republic, May 29-31,2006, Conference Proceedings, s. 361-364.
 135. Mazurkiewicz D. – “*Komputerowy system monitorowania stanu złączy taśm przenośnikowych*”. *Mechanizacja i Automatyzacja*, 4 (2006), s. 14-22.
 136. Mazurkiewicz D. – “*Monitoring the condition of adhesive-sealed belt conveyors in operation*”. *Eksploracja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*, 3 (2005), s. 41-49.
 137. Mazurkiewicz D. – “*Problems of numerical simulation of stress and strain in the area of the adhesive-bonded joint of a conveyor belt*”. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, Vol. IX, No. 2 (2009), s. 75-91.
 138. Mazurkiewicz D. – “*Problems of the identification of strength properties of rubber materials for purposes of numerical analysis: a review*”. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, Vol. X, No. 1, 2010, pp.: 69-85.
 139. Mazurkiewicz D. - “*System monitorowania stanu złączy taśm przenośnikowych*”. *Szkoła Eksploatacji Podziemnej 2007. Sympozja i Konferencje nr 69*. Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN. Kraków 2007, s. 817-825.
 140. Mazurkiewicz D. – “*Wytrzymałość i wytrzymałość złączy klejonych taśm przenośnikowych*”. *Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa*, 3 (2007), s. 28-33.

141. Mazurkiewicz D. - „*Analysis of the ageing impact on the strength of the adhesive sealed joints of conveyor belts*”. Journal of Materials Processing Technology, Elsevier, 208 (2008), s. 477-485.
142. Mazurkiewicz D. – „*Bezpieczna eksploatacja taśm FTT Stomil Wolbrom S.A. z systemem monitorowania ich połączeń*”. XV Międzynarodowe Sympozjum FTT Stomil Wolbrom S.A. „Nowe rozwiązania w transporcie przenośnikami taśmowymi”. Zakopane 2007, s. 113-124.
143. Mazurkiewicz D. – „*Computer system for monitoring conveyor belt joints*”. Canadian Mining Journal, 5 (2007), s. 24.
144. Mazurkiewicz D. – „*Tests of Extendability and Strength of Adhesive-Sealed Joints in the Context of Developing a Computer System for Monitoring the Condition of Belt Joints during Conveyor Operation*”. Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability, No. 3, 2010, s. 33-38.
145. Mazurkiewicz D., Galiński M. – „*Method of measurement and analysis of the extent of wear of rope wheel bearings in Bogdanka coal mine*”. Journal of Mining Science by Springer Science + Business Media, Inc., Vol. 43, No. 2 (2007), s. 171-178.
146. Mazurkiewicz D., Ikeda Y. – „*Bezinwazyjny układ pomiarowy ze wspomaganie technikami Data Mining*”. Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability, 1 (2001), s. 34-45.
147. Michalewicz Z., Fogel D. B. – „*Jak to rozwiązać czyli nowoczesna heurystyka*”. WNT, Warszawa 2006.
148. Mironowicz W., Hefszyc M., Halama A. – „*Monitorowanie i sterowanie z powierzchni procesem odstawy urobku ciągami rozgałęzionymi przenośników taśmowych w systemie SAT-36*”. III Międzynarodowa Konferencja „Nowoczesne przenośniki taśmowe dla węglowego górnictwa podziemnego”. Politechnika Śląska. Gliwice- Szczyrk 1998.
149. Moczulski W. – „*Metody pozyskiwania wiedzy dla potrzeb diagnostyki maszyn*”. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Mechanika, Gliwice, 1997, nr 130.
150. Moczulski W. A. – „*Diagnostyka techniczna. Metody pozyskiwania wiedzy*”. Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice 2002.
151. Niezgodna T. – „*Analizy numeryczne wybranych zagadnień mechaniki*”. WAT, Warszawa 2007.
152. Niziński St. – „*Zarządzanie eksploatacją obiektów technicznych za pomocą rachunku kosztów*”. Markar, Olsztyn-Bydgoszcz 2002.
153. Norma DIN 22110. Testing methods for conveyor belt joint; determination of time strength for conveyor belt joint; (dynamical testing method).

154. Norma DIN 22110-2. Testing methods for conveyor belt joints – part 2: endurance running tests, determination of running time belt joints at conveyor belts with textile plies.
155. Norma PN-C-94147:1997. Wyroby gumowe. Połączenia taśm przenośnikowych metodą wulkanizacji.
156. Norma PN-EN ISO 1120:2004. Taśmy przenośnikowe. Oznaczanie wytrzymałości połączeń mechanicznych. Metoda statyczna.
157. Norma PN-EN ISO 13934-1:2002. Tekstylia – właściwości płaskich wyrobów przy rozciąganiu. Część 1: Wyznaczanie maksymalnej siły i wydłużenia względnego przy maksymalnej sile metodą paska.
158. Norma PN-EN ISO 14890:2003. Taśmy tkaninowo-gumowe do przenośników ogólnego przeznaczenia.
159. Norma PN-EN ISO 283:2007. Taśmy przenośnikowe z rdzeniem tekstylnym -- Badanie rozciągania taśmy o całkowitej grubości -- Część 1: Oznaczanie wytrzymałości na rozciąganie, wydłużenia przy zerwaniu oraz wydłużenia przy zadanym obciążeniu
160. Norma PN-EN ISO 283-1:2002. Metody badań taśm przenośnikowych. Oznaczanie wytrzymałości na rozciąganie oraz wydłużenia względnego i trwałego.
161. Norma PN-EN ISO 7622-2:2004. Taśmy przenośnikowe z linkami stalowymi. Badanie właściwości trakcyjnych. Część 2: Pomiar wytrzymałości na rozciąganie.
162. Nowak R., Grzyb K. – „*Monitoring i badania laboratoryjne w procesie diagnostyki taśm przenośnikowych z rdzeniem z linek stalowych*”. Materiały XVI Międzynarodowego Sympozjum pt. „100 lat w służbie polskiego przemysłu wydobywczego”. FTT Stomil Wolbrom S.A., Zakopane 2008, s. 39-54.
163. Oracz J. – „*Wprowadzenie do zagadnień niezawodności i trwałości maszyn i urządzeń górniczych*”. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1999.
164. Osowski S. – „*Sieci neuronowe do przetwarzania informacji*”. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa 2000.
165. Osowski S. – „*Sieci neuronowe w ujęciu algorytmicznym*”. WNT, Warszawa 1996.
166. Osowski S. – „*Sieci neuronowe wykorzystujące systemy wnioskowania rozmytego*”. Software 2.0, 2 (2001), s. 18-20.
167. Packham D. E. – „*Handbook of adhesion*”. John Wiley & Sons, Chichester, UK, 2005.
168. Paleczek W. – „*Metody analizy danych na przykładach*”. Wydawnictwa Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2004.
169. Palit A. K., Popovic D. – „*Computational intelligence in time series forecasting. Theory and engineering applications*”. Springer-Verlag, London 2005.

170. Pasek J., Polniak A. – „*Doświadczenia eksploatacyjne w zakresie stosowania taśmy przenośnikowej typu GTP-ST 3150-10/8-2-I-1400 zabudowanej na przenośniku taśmowym Bogda 1400 w KWK Jankowice*”. Materiały XVI Międzynarodowego Sympozjum pt. „100 lat w służbie polskiego przemysłu wydobywczego”. FTT Stomil Wolbrom S.A., Zakopane 2008, s. 55-66.
171. Patan K., Korbicz J. – “*Neural Networks in diagnostics of technological processes*”. Przegląd Elektrotechniczny, 4 (2004), s. 331-334.
172. Pękala M., Radkowski St. – „*Gumowe elementy sprężyste*”. PWN, Warszawa 1989.
173. Piegat A. – “*Modelowanie i sterowanie rozmyte*”. Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2003.
174. Pypno Cz. – „*Kaseta do gromadzenia długich odcinków taśm przenośnikowych*”. Materiały XVI Międzynarodowego Sympozjum pt. „100 lat w służbie polskiego przemysłu wydobywczego”. FTT Stomil Wolbrom S.A., Zakopane 2008, pp. 83-88.
175. Quarteroni A., Saleri F. – “*Scientific computing with MATLAB*”. Springer, Berlin 2005.
176. Quek M. Y. – “*Analysis of residual stresses in a single fibre-matrix composite*”. International Journal of Adhesion & Adhesives, 24 (2004), s. 379-388.
177. Rao A. V. S., Pratihari D. K. – “*Fuzzy logic-based expert system to predict the results of finite element analysis*”. Knowledge Based Systems, Vol. 20, 1 (2007), s. 37-50.
178. Report “*Integrated manufacturing technology roadmapping project – Intelligent controls for discrete manufacturing*”. Prepared by the IMTR Intelligent Controls Workshop Group and the IMTR Roadmapping Project Team, IMTI, Inc., Oak Ridge, 2000.
179. Ristovic I. – „*Enhancing the energy efficiency of continuous conveyance systems in coal mines through the system rationalization and automation*”. Materiały XVI Międzynarodowego Sympozjum pt. „100 lat w służbie polskiego przemysłu wydobywczego” - suplement. FTT Stomil Wolbrom S.A., Zakopane 2008, s. 5-10.
180. Ristovic I. – „*Model for optimization of continuous haulage systems parameters*”. Nowe rozwiązania w transporcie przenośnikami taśmowymi. XV Międzynarodowe Sympozjum, FTT STOMIL Wolbrom S. A., Zakopane 2007, s. 125-132.
181. Rośkowicz M. – “*Wytrzymałość długotrwałych połączeń klejowych*”. Rozprawa doktorska. Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa 2004.
182. Ross T. J. – „*Fuzzy logic with engineering applications*”. Wiley&Sons Ltd. , New York 2005.

183. Ruiz M. J. G., Gonzales L. Y. S. – “*Comparison of hyperelastic material models in the analysis of fabrics*”. International Journal of Clothing Science and Technology, Vol. 18, no. 5 (2006), s. 314-325.
184. Rutkowska D. – „*Inteligentne systemy obliczeniowe. Algorytmy genetyczne i sieci neuronowe w systemach rozmytych*”. Akademicka Oficyna Wydawnicza PLJ, Warszawa 1997.
185. Rutkowska D., Piliński M., Rutkowski L. – „*Sieci neuronowe, algorytmy genetyczne i systemy rozmyte*”. PWN, Warszawa- Łódź, 1999.
186. Rutkowski L. – „*Metody i techniki sztucznej inteligencji*”. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2005.
187. Sheppard A., Kelly D., Tong L. – “*A damage zone model for the failure analysis of adhesively bonded joints*”. International Journal of Adhesion and Adhesives, 18 (1998), s. 385-400.
188. Sikora R. – „*Tworzywa wielkocząsteczkowe. Rodzaje, właściwości i struktura*”. Wydawnictwa Uczelniane Politechniki Lubelskiej, Lublin 1991.
189. Software Abaqus analysis user’s manual, Dassault Systèmes, 2007.
190. *Splicing instruction EP-conveyor Belts. Step-splice, cold*. Metso Minerals 05/01 (materiały wewnętrzne, niepublikowane).
191. Standard practice for rubber – measurement of dimensions. ASTM International, Designation: D 3767-03.
192. Strykowski P. – „*Zastosowanie logiki rozmytej i algorytmów genetycznych do lingwistycznych podsumowań baz danych*”. Rozprawa doktorska (niepublikowana), IBS PAN, Warszawa 1998.
193. Szczygielska M., Mróz J., Broja A., Dyduch J., Augustowski W. – „*Monitorowanie uszkodzeń taśm przenośnikowych w oparciu o zaimplantowane elementy detekcyjne*”. Transport Przemysłowy, nr 3 (2002), s. 42-47.
194. Tadeusiewicz R. – „*Problemy wyboru właściwej architektury sieci neuronowej*”. Informatyka w technologii materiałów. No 1, T.1 (2001), s. 3-22.
195. *Taśmy przenośnikowe i inne produkty gumowe – poradnik*. Fabryka Taśm Transporterowych Stomil Wolbrom S.A., Wolbrom 2008.
196. *The website for the mining, tunneling and quarrying technologies*. www.mining-technology.com.
197. Tong L., Grant St. P. – “*Analysis and design of structural bonded joints*”. Springer, Berlin 1999.
198. Wędrychowicz D., Kulinowski P. – “*Koncepcja bazy wiedzy o procesie eksploatacji przenośników taśmowych*”. Transport, 2 (2008), s. 30-34.

199. Wnuk P. – *“Algorytmy optymalizacji struktury rozmytych modeli dynamicznych”*. Rozprawa doktorska (niepublikowana). Politechnika Warszawska, Wydział Mechatroniki, Warszawa 2004.
200. Wójcicki W. – *„Wybrane sposoby zwiększania komfortu pracy taśm w przenośnikach taśmowych”*. Nowe rozwiązania w transporcie przenośnikami taśmowymi. XV Międzynarodowe Sympozjum, FTT STOMIL Wolbrom S. A., Zakopane 2007, s. 145-151.
201. Xiaonan Lou, Wenbang Hou, Yi Li, Zhong Wang – *“A fuzzy neural network model for prediction clothing thermal comfort”*. Computers and Mathematics with Applications 53 (2007), s. 1840-1846.
202. Yadav R. N., Kalra P. K., John J. – *“Time series prediction with single multiplicative neuron model”*. Applied Soft Computing 7 (2007), s. 1157-1163.
203. Yager R.R., Filev D.P. – *„Podstawy modelowania i sterowania rozmytego”*. WNT, Warszawa 1995.
204. Żółtowski B., Cempel C. (red.) – *„Inżynieria diagnostyki maszyn”*. Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji, Radom 2004.
205. Żółtowski B., Niziński St. – *„Modelowanie procesów eksploatacji maszyn”*. Wydawnictwo Markar, Bydgoszcz, Sulejówek 2002.
206. Żółtowski B., Tylicki H. - *„Elementy diagnostyki technicznej maszyn”*. Wydawnictwo Państwowej Wyższej Szkoły Zawodowej w Pile, Piła 2008.
207. Żółtowski B., Tylicki H. - *„Wybrane problemy eksploatacji maszyn”*. Wydawnictwo Państwowej Wyższej Szkoły Zawodowej w Pile, Piła 2004.
208. Żur T. – *„Projektowanie długich przenośników taśmowych dla nowych oraz modernizowanych systemów transportowych uruchamianych z początkiem XXI wieku”*. Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej nr 83, Seria Konferencje nr 22 – *„Podstawowe problemy transportu kopalnianego”*. XII Szkoła Jesienna *„Monitorowanie, diagnostyka i badania urządzeń transportu taśmowego”*, Świeradów Zdrój, 23-26 września 1998. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1998, s. 163-171.
209. Żur T., Hardygóra M. – *“Przenośniki taśmowe w górnictwie”*. Wydawnictwo Śląsk, Katowice 1996.
210. Żurada J., Barski M., Jędruch W. – *„Sztuczne sieci neuronowe”*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1996.