

Diagnostyka osi zestawów kołowych układów biegowych pojazdów trakcyjnych i tocznych

W artykule przedstawiono obecny stan diagnostyki układów biegowych pojazdów trakcyjnych oraz tocznych, ze szczególnym uwzględnieniem osi zestawów kołowych. Omówiono stan techniczny obecnie eksploatowanych osi zestawów kołowych oraz aktualnie stosowanych metod diagnostycznych. Przedstawiono przyczyny pęknięć osi zestawów kołowych, które mogą spowodować wypadki lub katastrofy kolejowe. Zaprezentowano perspektywy rozwoju i wprowadzenia nowych metod diagnostycznych stanu osi zestawów kołowych, które zwiększałyby bezpieczeństwo eksploatowanego taboru. Artykuł został opracowany w ramach projektu badawczo-rozwojowego Nr 10 00 4806 pt. „ Mikroprocesorowy system diagnostyczny głównych systemów trakcyjnego pojazdu szynowego uwzględniający ocenę bieżącą i prognozowanie stanów”, finansowanego z budżetu Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

1. WSTĘP

Jednym z istotnych zespołów, decydującym najbardziej o bezpieczeństwie eksploatacyjnym pojazdów szynowych trakcyjnych jest układ biegowy. Taka teza ma uzasadnienie w bezpośrednim kontakcie układu biegowego z torem, który jest źródłem wymuszeń dynamicznych i kinematycznych, działających bezpośrednio na koło. Sprawny układ biegowy gwarantuje nie tylko bezpieczną eksploatację pojazdu, ale również stanowi gwarancję do prawidłowego stanu utrzymania toru oraz założonych okresów międzynaprawczych jak również urządzeń stałych należących do infrastruktury kolejowej współpracujących z pojazdem. Jak wykazują doświadczenia eksploatacyjne niesprawność układu biegowego ma bardzo poważne konsekwencje w postaci wypadków i katastrof kolejowych, stanowiących zagrożenie dla zdrowia i życia pasażerów i personelu obsługującego, powodujących znaczne straty materialne oraz będących przyczyną skażenia środowiska naturalnego. Metoda zwiększenia bezpieczeństwa eksploatacyjnego przez zwiększenie tzw. „rezerwy wytrzymałościowej” prowadzi do przewymiarowania konstrukcji i z punktu widzenia obecnych wymagań rynkowych oraz konkurencyjności transportu kolejowego nie może być brana pod uwagę. Nawet gdyby ją realizowano nie gwarantowałaby ona bezpieczeństwa eksploatacyjnego, przy złym stanie utrzymania poszczególnych podzespołów układu biegowego. Taki wniosek pozwala na szukanie innych metod zapewnienia bezpieczeństwa eksploatacyjnego. Bezpieczeństwo eksploatacyjne jako czynnik sam w sobie podwyższa konkurencyjność transportu szynowego.

2. PODSTAWOWE METODY STOSOWANE W DIAGNOSTYCE UKŁADÓW BIEGOWYCH ORAZ WÓZKÓW POJAZDÓW KOLEJOWYCH

2.1. FUNKCJA UKŁADÓW BIEGOWYCH I WÓZKÓW W POJAZDACH SZYNOWYCH

Układ biegowy pełni bardzo istotną rolę w pojeździe trakcyjnym lub tocznym i jego prawidłowy stan techniczny powinien zagwarantować:

- przeniesienie wszystkich sił działających na pojazd podczas eksploatacji
- bezkolizyjną współpracę z pudłem podczas wszystkich ekstremalnych przypadków eksploatacyjnych (przejazd przez górkę rozrządową, wjazd na prom, przejazd przez łuk o minimalnym promieniu)
- zagwarantowanie prawidłowych własności dynamicznych (komfort jazdy, bezpieczeństwo przewożonych osób i ładunków) i spełnienie kryteriów wg normy PN-EN 14363:2005(U) [15]
- bezpieczeństwo przed wykolejeniem podczas jazdy w warunkach quasi-statycznych tzn. z małymi prędkościami oraz w przypadku występowania wysokich wartości współczynników tarcia w układzie koło-szyna oraz podczas jazdy z dużymi prędkościami przy zachowaniu kryteriów wg normy PN-EN 14363:2005(U) [15] oraz raportu ORE/ERRI B55 Rp.8 [17]

- prawidłowe wartości dróg hamowania
- emisję hałasu do środowiska naturalnego o wartościach poniżej dopuszczalnych
- prawidłową współpracę (kompatybilność) z urządzeniami infrastruktury np. **HOA** (urządzenia do wykrywania przegrzanych łożysk tocznych), **FBOA** (urządzenia do wykrywania przegrzanych tarcz hamulcowych), z urządzeniami systemu zabezpieczenia ruchu pociągów **SHP**, hamulcami torowymi
- ochronę środowiska naturalnego przed emisją substancji szkodliwych do jakich należą produkty zużycia okładzin ciernych i powierzchni ciernych tarcz hamulcowych, koła oraz wstawek klocków hamulcowych, wstawek z tworzyw sztucznych w gnieździe skrętu oraz na ślizgach bocznych, smary łożyskowe, oleje przekładniowe, media do smarowania obrzeży kół
- możliwie niskie koszty przeglądów i napraw **LCC** (ang. „life cycle cost”), które sprowadza się do bezobsługowości węzłów konstrukcyjnych oraz niezawodności.

2.2. OBCIĄŻENIA DZIAŁAJĄCE NA UKŁAD BIEGOWY

Elementy układów biegowych pojazdów trakcyjnych (lokomotywy, zespoły trakcyjne) i tocznych (wagony osobowe i towarowe) podlegają następującym obciążeniom podczas eksploatacji, wynikającym z oddziaływania tor-pojazd:

- ⇒ nadzwyczajnym obciążeniom statycznym, wynikającym z nałożenia się różnych ekstremalnych przypadków eksploatacyjnych
- ⇒ obciążeniom udarowym (uderzeniowym) powstającym podczas prób nabiegania (prace manewrowe i rozrządowe, fala hamowania itd.) oraz zderzeń kontrolowanych w ramach aktywnego i pasywnego bezpieczeństwa pojazdu szynowego
- ⇒ obciążeniom zmęczeniowym o charakterze cyklicznym.

Wielkości tych obciążeń są zdefiniowane w metodach obliczeniowych wytrzymałości poszczególnych elementów i podzespołów, które są przedstawione w dokumentach ORE/ERRI, kartach UIC oraz normach europejskich opracowanych przez Europejski Komitet Normalizacyjny i tak:

- dla ramy wózka w prEN 13749:2008(E) [16] (ramy wózków dla wszystkich rodzajów pojazdów), karcie UIC 510-3 [7] (ramy wózków towarowych), karcie UIC 515-4 [9] (ramy wózków osobowych), karcie UIC 615-4 [10] (ramy wózków pojazdów trakcyjnych)
- dla osi zestawów kołowych napędnych w PN-EN 13104:2004 [13], natomiast dla osi zestawów kołowych tocznych w PN-EN 13103:2003

[12]; metodyki obliczeń dla obydwu typów osi są przedstawione karcie UIC 515-3[8], natomiast dla osi tocznych wagonów towarowych oraz osobowych jest przedstawiona w raporcie ORE/ERRI B136/Rp.11/D [18].

Wszystkie te obciążenia mogą być przyczyną uszkodzeń elementów nośnych układów biegowych, do których zalicza się:

- ⇒ ramę wózka wraz z częściami przyspawanymi (wspornikami) np. do mocowania elementów hamulca, tłumików drgań pionowych, poprzecznych oraz wężykowania, wahaczy, mechanizmu do sterowania radialnego, mechanizmu do przeniesienia siły pociągowej, oparcia nadwozia, prowadzenia zestawów kołowych
- ⇒ zawieszenie pierwszego i drugiego stopnia (sprężyny śrubowe, resory piórowe, elementy gumowo-metalowe, poduszki pneumatyczne)
- ⇒ zestawy kołowe wraz z częściami jakimi są koła monoblokowe, koła bosc, obręcze, koła zębate napędu, tarcze hamulcowe oraz osie
- ⇒ stabilizatory pochylania, zabezpieczające pudło pojazdu przed nadmiernym pochylaniem się podczas przejazdu przez łuki toru z niedostatecznością lub nadmiarem przechyłki
- ⇒ korpusy maźnic zastosowanych w zawieszeniu pierwszego stopnia
- ⇒ aparat pociągowy (w wózkach trakcyjnych)
- ⇒ elementy do oparcia pudła na wózku lub połączenia wózek-nadwozie
- ⇒ elementy hamulca (jak np. trójkąty hamulcowe w wagonach towarowych,
- ⇒ obsady klocków hamulcowych, dźwignie i ciągną)
- ⇒ łożyska toczne.

Wytrzymałość elementów nośnych wózka na działanie nadzwyczajnych sił statycznych, obciążeń udarowych oraz obciążeń zmęczeniowych spada dodatkowo w wyniku działania:

- ⇒ czynników atmosferycznych, powodujących korozję; korozja jest przyczyną stopniowego zmniejszania warstwy nośnej (ubytek efektywnego przekroju), co powoduje coraz większe wyężenie materiału pod wpływem obciążeń pojawiających się w eksploatacji oraz pęknięć warstwy wierzchniej. Zmniejszenie efektywnego przekroju powoduje skłonność konstrukcji do odkształceń trwałych i utraty geometrii, co może spowodować utratę funkcji (brak poprawnej współpracy części) a mikropęknięcia powstające w warstwie wierzchniej są „ogniskami” przyszłych pęknięć zmęczeniowych, rozwijający się stopniowo (tzw. propagacja pęknięcia)

- ⇒ przypadkowych uszkodzeń mechanicznych części lub podzespołów (np. uderzenia tłucznią) podczas eksploatacji
- ⇒ czynników cieplnych, powstających np. w wyniku procesu hamowania, przegrzania łożysk podczas eksploatacji
- ⇒ procesu relaksacji (zaniku) naprężeń ściskających, powstających w wyniku zabiegów technologicznych na etapie wytwarzania do jakich można zaliczyć operacje wykonywane na powierzchni zewnętrznej np. kulowanie (śrutowanie), wałeczowanie (rolowanie powierzchni), dogniatanie utwardzające, ulepszanie cieplne; zabiegi technologiczne powodują wytworzenie naprężeń ściskających, które posiadając przeciwny znak do naprężeń rozciągających zwiększają wytrzymałość zmęczeniową.
- ⇒ występowania naprężeń własnych w elementach nośnych, które powstały na etapie wytwarzania oraz pojawiają się w trakcie eksploatacji.

2.3. METODY KLASYCZNE STOSOWANE DO DIAGNOSTYKI CZĘŚCI I PODZESPOŁÓW UKŁADÓW BIEGOWYCH

Aby zapewnić prawidłowe funkcjonowanie układu biegowego podczas eksploatacji niezbędne jest stosowanie diagnostyki technicznej przez którą definiuje się jako „określanie stanu technicznego danego urządzenia i lokalizację ewentualnych usterek bez konieczności demontażu całego urządzenia” [3]. Przez stan techniczny obiektu jakim jest układ biegowy rozumie się zbiór jego właściwości technicznych, które umożliwiają wypełnianie podstawowych funkcji, założonych podczas konstruowania i zrealizowanych w procesie produkcji.

Do podstawowych (tradycyjnych) metod stosowanych w diagnostyce układów biegowych pojazdów trakcyjnych (lokomotywy, zespoły trakcyjne) oraz tocznych należą:

- **metoda wizualna VT:** uznaje się ją jako podstawową metodę badawczą. Polega ona na sprawdzeniu nie uzbrojonym okiem lub z wykorzystaniem przyrządów optycznych (optoelektronicznych) czy na powierzchni badanego obiektu występują niezgodności (np. pęknięcia, błędy w wykonaniu spoiny np. podtopienia brzegowe, nalew lica, brak przetopu) a następnie na zmierzeniu ich charakterystycznych wymiarów. Oględziny często wymagają specjalistycznego wyposażenia (boroskopy, fiberoskopy). Głównymi wymaganiami poprawnie przeprowadzonych oględzin są: odpowiednie kwalifikacje, dobry wzrok badającego, dostateczne natężenie

światła (500 lux) oraz umiejętność wyróżnienia i interpretacji niezgodności. Badania wizualne powinny być przeprowadzone jako pierwsze.

- ⇒ **metoda magnetyczna MT:** badania magnetyczne polegają na wzbudzeniu w badanych obiektach pola magnetycznego i poszukiwaniu tzw. lokalnych, magnetycznych pól rozproszenia, powstających nad powierzchnią obiektu w miejscu występowania niezgodności (np. głównie pęknięć i przyklejeń spawalniczych). Do wykrywania pól rozproszenia można wykorzystać proszki ferromagnetyczne, taśmę magnetyczną, sondę Halla. Metoda ta umożliwia wykrycie niezgodności wychodzących na powierzchnię lub podpowierzchniowych do 2 mm głębokości. Charakteryzuje się dużą prędkością i natychmiastowym wynikiem. Stosowanie tej metody jest ograniczone stanem powierzchni, zbyt dużą chropowatością, nierównością powierzchni utrudnia lub wyklucza obiektywny wynik badania. Badania można przeprowadzić tylko na materiałach ferromagnetycznych (stale z wyjątkiem stali austenitycznych, posiadających przechłodzony austenit np. stale stosowane na płytki cierne w korpusach przewodnic oraz korpusach maźnic – kategoria E wg karty UIC 893 [11]) co wyklucza: tytan i stopy aluminium. Wadą badań magnetycznych jest magnetyzm szczątkowy pozostały w badanych elementach, który należy usunąć.

- ⇒ **metoda penetracyjna PT:** zasada badań penetracyjnych opiera się na wykorzystaniu zjawiska włoskowatości, które polega na wnikaniu cieczy do wąskich przestrzeni i wznoszeniu się jej w kierunku przeciwnym do działania siły ciężkości. Zjawisko włoskowatości wykazują tylko niektóre ciecze, im ciecz ma lepszą zwilżalność materiału tym jest bardziej przydatna. Metoda ta służy do wykrywania niezgodności wychodzących nad powierzchnię (pęknięcia i przyklejenia spawalnicze). Metoda penetracyjna może być zastosowana jedynie wtedy, gdy wada która może być wykryta jest otwarta na powierzchni. Ograniczeniem jest zastosowana porowatość powierzchni badanej. Na przygotowaną powierzchnię (suchą, oczyszczoną i odtłuszczone) nanosi się penetrant w postaci drobnocząsteczkowej zawiesiny o kolorze czerwonym lub niebieskim, albo fluorescencyjną. Zawiesina ta wnika w szczeliny i po czasie penetracji jest usuwana wyłącznie z powierzchni. Następnie powierzchnię pokrywa się wywoływaczem – wielkocząsteczkową białą zawiesiną. Po czasie wywoływania

(5÷60 minut) penetrant dyfunduje do szczelin i zabarwi lokalnie wywoływacz wskazując jednocześnie miejsca wystąpienia niezgodności. Oceny przy barwnych środkach penetrujących wykonuje się przy świetle dziennym, przy czym minimalna wartość natężenia światła musi wynosić minimum 500 luxów. Zaletą metody penetrującej jest jej wysoka czułość. Typowe pęknięcia, które mogą być wykryte metodą penetrującą posiadają szerokość od 0,5 do 10 μm , a głębokość od 20÷200 μm . Podane dane mają charakter orientacyjny, ponieważ w poszczególnych przypadkach mogą wystąpić znaczne odchylenia od podanych wartości. Do badań penetrujących stosuje się gotowe preparaty, które zgodnie z wymaganiami norm lub przepisów powinny posiadać atest.

⇒ **metoda ultradźwiękowa UT:** metoda ta wykorzystuje zjawiska akustyczne zachodzące w badanych obiektach. Polega ona na wprowadzeniu fal mechanicznych (nazywanych także falami ultradźwiękowymi o częstotliwości powyżej 20 000 Hz) do materiału za pomocą głowicy, której głównym elementem jest tzw. przetwornik (cienka płytka z materiału piezoelektrycznego) i następnie obserwowaniu odpowiedzi zwrotnej:

- czasu przejścia fali i jej amplitudy (technika echa) przepuszczania
- zmiany amplitudy fali która spenetrowała daną przestrzeń (technika przepuszczania)
- zmiany fazy i czasu przejścia dla fal dyfrakcyjnych powstających na krawędziach nieciągłości (technika TOFD).

Metoda ultradźwiękowa umożliwia lokalizację (współrzędne x, y i z) i określenie wielkości nieciągłości, znajdujących się wewnątrz materiału. Pobudzanie przetwornika piezoelektrycznego impulsami elektrycznymi oraz „nasłuch” odbywa się za pomocą defektoskopu ultradźwiękowego. Metoda ultradźwiękowa ma wiele zastosowań: badanie złączy spawanych, odlewów, odkuwek i blach w celu wykrycia rozwarstwień materiałowych jak również pomiary grubości oraz naprężeń własnych. Za pomocą metody ultradźwiękowej wykrywa się między wady punktowe (**P**) o minimalnym wymiarze równoważnym 0,5 mm, wady liniowe (**L**) i wady rozległe (**L**). Aby badania były skuteczne, konieczne są wysokie kwalifikacje badającego i aparatura wysokiej klasy. Do zalet badań ultradźwiękowych zalicza się między innymi:

- duża uniwersalność i skuteczność metody
- duża szybkość metody i otrzymywanie wyników bezpośrednich
- możliwość dokładnej lokalizacji wad wewnętrznych i zewnętrznych
- możliwość wykrywania wad punktowych o nominalnym wymiarze równoważnym 0,5 mm, wąskoszczelinowym od 0,001 mm i wychodzących na powierzchnię o głębokości od ok. 0,1 mm
- przenośna (mobilna) lekka aparatura.

⇒ **metoda radiograficzna RT:** polega na prześwietleniu strefy badanego obiektu np. spoiny promieniowaniem jonizującym gamma lub **X**. Informacje o obecności nieciągłości uzyskuje się w wyniku zmiany natężenia promieniowania przechodzącego przez obiekt. Zmiany te są rejestrowane na przykład za pomocą błony radiograficznej, która po wywołaniu daje zobrazowanie wskazań w postaci obrazów o różnej gęstości optycznej. Na podstawie interpretacji radiogramu można stwierdzić obecność wad zalegających w objętości materiału np.: wtrąceń, pęknięć itp. Metoda radiograficzna nie daje pewnej informacji o głębokości zalegania wskazań. Metodą radiograficzną wykrywa się wady wewnętrzne w spoinach typu: pęcherze gazowe, wtrącenia, przyklejenia, brak przetopu, pęknięcia, wady powierzchni i kształtu. Wykrywalność wad przy użyciu promieniowania gamma jest znacznie gorsza niż przy zastosowaniu promieniowania **X**.

Ww. metody są stosowane na etapie wytwarzania, w przeglądach i naprawach układów biegowych pojazdów szynowych odpowiadającym poziomom P1÷P5 (odpowiednio dotychczasowy przegląd kontrolny-P1, przegląd okresowy-P2, przegląd okresowy poszerzony-P3, naprawy okresowe-P4, naprawy główne i modernizacja pojazdów kolejowych-P5) wg Rozporządzenia Ministra Infrastruktury Nr 1771 z dnia 12.05.2005 [19] w odniesieniu do takich elementów układu biegowego jak: spoiny ramy, osie, koła, koła zębate napędu osadzone na osi, sprężyny śrubowe, korpusy maźnic.

2.4. ROZWÓJ METOD DIAGNOSTYCZNYCH DLA UKŁADÓW BIEGOWYCH POJAZDÓW SZYNOWYCH

Metody opisane w p.3 należą już do klasycznych i są wdrożone do techniki kolejowej na skalę masową. Poniżej opisano metody pilotażowe, których skuteczność została już dowiedziona jednak ze względu na koszty, nie mają jeszcze powszechnego zastosowania.

Do nowych metod diagnostycznych, które obecnie są lub mogą być wdrożone układów biegowych pojazdów szynowych można zaliczyć:

➤ **metodę MPM –Magnetycznej Pamięci Metalu:** Metoda ta należy do pasywnej metody kontroli nieniszczącej i oparta jest na rejestracji i analizie rozkładu własnych pól magnetycznych pól rozproszonych (WMPR), powstających w wyrobach i urządzeniach w strefach koncentracji naprężeń (SKN). Własne pola magnetyczne przedstawiają nieodwracalną zmianę namagnesowania odzwierciedlające kierunek działania głównych naprężeń od obciążeń roboczych., a także strukturalną i technologiczną dziedziczność metalu wyrobu lub spoiny po ich wykonywaniu a następnie schłodzeniu w magnetycznym polu ziemskim. W trakcie kontroli MPM wykorzystywane jest naturalne namagnesowanie, które pojawia się w postaci magnetycznej pamięci metalu podczas faktycznych odkształceń czego następstwem jest zachodzenie zmian strukturalnych w metalu wyrobów i urządzeń. Podstawy fizyczne metody MPM polegają na:

- zjawiskach, mających charakter magneto-sprężysty i magnetomechaniczny
- zjawisku tworzenia się i umiejscowienia granic domen magnetycznych w ściankach dyslokacji w strefach koncentracji naprężeń
- zjawisku rozproszenia pola magnetycznego na skutek występowania strukturalnych i mechanicznych niejednorodności w warunkach naturalnego namagnesowania się metalu spowodowanego obciążeniami.

Metoda MPM może być użyta do wykrywania:

1. strefy koncentracji naprężeń z dokładnością do 1 mm- podstawowe źródło uszkodzeń
2. mikro i makro wady na powierzchni i w głębszych warstwach metalu.

Do podstawowych zalet metody MPM należą:

- nie jest wymagane żadne przygotowanie powierzchni
- nie jest wymagane sztuczne namagnesowanie, ponieważ MPM wykorzystuje naturalne namagnesowanie uformowane podczas wykonywania lub eksploatacji wyrobu
- możliwość stosowania do kontroli obiektu podczas produkcji jak również podczas wykonywania przeglądów i napraw.

➤ **metodę badań właściwości wyrobów z wykorzystaniem zjawiska Barkhausena:**

Metoda ta polega na wykorzystaniu zjawiska fizycznego zachodzącego w materiałach ferromagnetycznych w trakcie ich „przemagnesowania”. Pod wpływem przemiennej zewnętrznej pola magnetycznego, wytwarzanego przez elektromagnes jarzmowy, następuje cykliczna przebudowa struktury domenowych, polegająca na zmianie

orientacji domen magnetycznych i skokowym przesuwaniu się ich granic (efekt Barkhausena). Przebieg tego zjawiska jest determinowany przez szereg czynników, takich jak: skład chemiczny, stan naprężeń wewnętrznych, budowa mikro-strukturalna, czy też stopień namagnesowania badanego wyrobu. Skokowy charakter tego ruchu objawia się w lokalnych zaburzeniach indukcji wewnątrz badanego materiału, te zaś mogą być wykrywane za pomocą cewki pomiarowej, zbliżonej do powierzchni materiału i w której indukują się impulsy napięciowe. Charakterystyczne widmo napięciowe, które zawiera się w cewce pomiarowej określane jest jako szum Barkhausena (MSB). Sygnał ten może być charakteryzowany przez parametry elektryczne takie jak: amplituda A_{MSB} , wartość skuteczna RMS_{MSB} , liczba impulsów Barkhausena o danej amplitudzie w jednostce czasu N_C , czy też parametry geometryczne i zależności czasowe, opisujące kształt obwiedni szumu Barkhausena. Metoda MSB jest stosowana w przemyśle hutniczym do pomiaru naprężeń własnych oraz do oceny budowy mikro-strukturalnej stali. Szerzy opis metody wraz ze stosowaną aparaturą jest przedstawiony w [1]. Metoda ta znajduje jednak coraz szersze zastosowanie, jak np. do wykrywania mikropęknięć obręczy kół kolejowych oraz tarcz hamulcowych. W przypadku występowania niejednorodności struktury metalograficznej (dyslokacje, defekty kryształowe, niejednorodności materiałowe) oraz nieciągłości materiałowe (wtrącenia, pęknięcia) pojawia się blokowanie przemieszczeń ścian domenowych. Spowodowana tym nieciągła struktura domenowa wywołuje zaburzenia indukcji, wykrywane specjalnymi układami pomiarowymi. Zaletą tej metody jest niewątpliwie możliwość wykrywania mikropęknięć, które są najtrudniejsze do diagnozowania.

➤ **metodę laserową:**

metoda stopniowo wdrażana w kolejnictwie, która pozwala na bezdotykowe, komputerowe badanie kół taboru kolejowego, wjeżdżającego do stacji postojowej. Pomiarom podlegają następujące parametry wieńca zewnętrznego zestawów kołowych: wysokość obrzeża O_w , grubość obrzeża O_g i stromość obrzeża q_R (wszystkie parametry z dokładnością do 0,1 mm) średnice obu zestawów kołowych (z dokładnością 0,1±0,2 mm), odległość obręczy A_Z (z dokładnością do 0,1 mm) oraz różnicę przekątnych odległości pomiędzy osiami wózków (z dokładnością do 0,2 mm). Do tego celu są wykorzystywane takie narzędzia pomiarowe jak bariery laserowe, mikromierze laserowe i czujniki przemieszczenia elementów ruchomych stanowiska. Stanowisko do badań jest wyposażone w laserowe kamery liniowe i powierzchniowe z elementami **CCD** i **CMOS**.

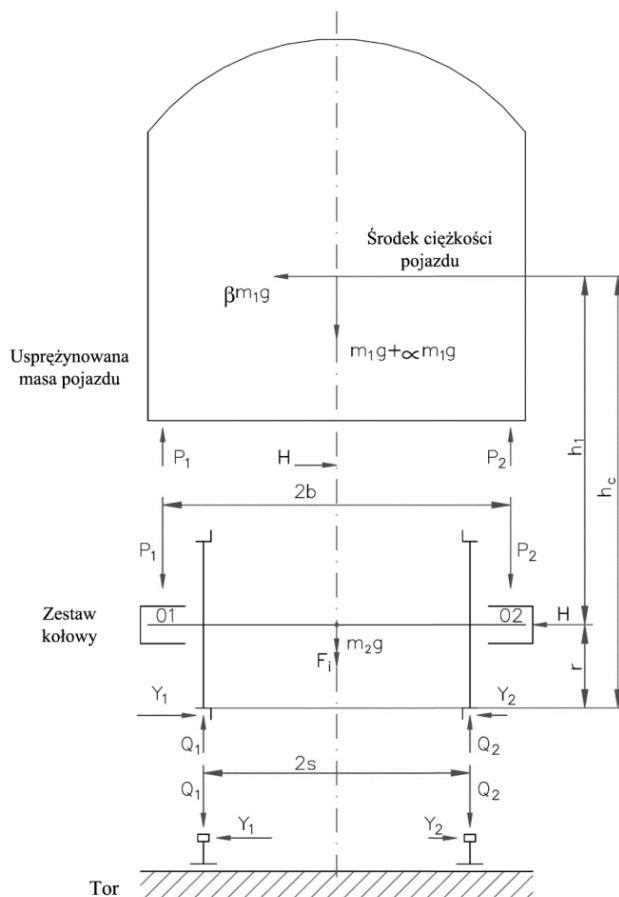
Kamery wraz z laserami są umieszczone w obudowach, do których wprowadzane jest powietrze o stałej temperaturze dla zachowania dużej dokładności pomiaru oraz dla zabezpieczenia przed pyłem i wodą elementów optycznych. Kluczową częścią systemu jest specjalne oprogramowanie do przetwarzania obrazów cyfrowych, które w całości jest opracowane przez firmę P.U.T. GRAW sp. z o.o. na podstawie wieloletnich doświadczeń związanych z konstruowaniem urządzeń pomiarowych, a także z wykorzystaniem technik analizy obrazów oraz fotogrametrii. Jedno ze stanowisk do pomiaru kół wagonów znajduje się w Zakładzie Eksploatacji Warszawa Grochów PKP Intercity S.A [5]. Prototypowe stanowisko do pomiarów zużycia zestawów kołowych z użyciem techniki laserowej jest zastosowane również przez MPK w Krakowie [2]. Elementem limitującym przebiegi międzyprawcze pojazdu tramwajowego są koła. Ich zużywanie powoduje konieczność „reprofilacji” zarysu zewnętrznego (powierzchni toczonej i obrzeża) i napraw różnego rodzaju, przywracających im pełną przydatność eksploatacyjną. W związku z powyższym opracowano stanowisko do monitorowania intensywności zużycia zestawów kołowych tramwaju, które jest wyposażone w system wykrywający obecność tramwaju. Pomiar dokonywany jest za pomocą odpowiednio rozmieszczonych czujników laserowych.

- **metodę emisji cieplnej** – wykorzystuje zjawiska cieplne zachodzące w trakcie procesu zmęczenia, wynikające ze zjawiska odkształceń plastycznych. Zjawiska te przebiegają z określoną intensywnością w obszarach inicjacji pęknięć i w strefie wierzchołka rozwijającego się pęknięcia i można je rejestrować odpowiednio czułymi kamerami termowizyjnymi. Zjawiska cieplne można intensyfikować przez zewnętrzne źródła ciepła, np. wiązki lasera, wiązki elektronowej lub jonowej.
- **metodę przyrostu chropowatości** – oparte są na zjawisku wzrostu nierówności chropowatości powierzchni, spowodowanych w pierwszych stadiach procesu zmęczenia przez poślizgi w skali struktury, ekstruzje i intruzje, następnie po kształtowaniu się strefy plastycznego odkształcenia w obszarze inicjacji pęknięcia i na jego czole. Metodę tę zastosowano na szeroką skalę w badaniach półeliptycznych pęknięć zmęczeniowych.

3. DIAGNOSTYKA OSI ZESTAWÓW KOŁOWYCH

3.1. WYTRZYMAŁOŚĆ OSI

Jednym z niewralgicznych elementów układu biegowego pojazdów jest zestaw kołowy. Jak wykazuje długoletnia praktyka eksploatacyjna jest to podzespół bardzo mocno obciążony zarówno w zakresie obciążenia osi jak również koła. Układ sił działających na zestaw kołowy jest przedstawiony na rys.1.



Legenda do rys.1:

- α - przyspieszenie pionowe $\alpha=0,25g$ ($2,45 \text{ m/s}^2$),
- β - przyspieszenie poprzeczne $\beta=0,15g$ ($1,47 \text{ m/s}^2$),
- m_1 (kg)-masa przypadająca na zestaw kołowy,
- m_2 (kg)-masa kompletnego zestawu kołowego (nie-omażnicowanego),
- m_1+m_2 (kg)-masa pojazdu odpowiadająca naciskowi zestawu kołowego na tor,
- P (N)-nacisk zestawu na tor (szyny) w stanie statycznym:

$$P = \frac{m_1 + m_2}{2} \cdot g \quad (1)$$

- P_0 (N)-siła statyczna przypadająca na czop osi zestawu kołowego, jeśli zestaw kołowy jest obciążony symetrycznie $P_0=0,5 \cdot m_1g$,
- P_1 (N)-siła pionowa działająca na lewy czop w ruchu pojazdu z największym obciążeniem,
- P_2 (N)-siła pionowa działająca na prawy czop w ruchu pojazdu z najmniejszym obciążeniem,
- Y_1 (N)- pozioma siła występująca między obrzeżem lewego koła, a szyną po stronie bardziej obciążonego czopa,
- Y_2 (N)- pozioma siła, występująca między obrzeżem prawego koła, a szyną po stronie mniej obciążonego czopa,
- H (N)-pozioma siła działająca w osi zestawu kołowego równoważąca działanie sił Y_1 i Y_2
- Q_1 (N)-pionowa reakcja szyny na koło, położona po stronie bardziej obciążonego czopa osi,

Q_2 (N)-pionowa reakcja szyny na koło, położona po stronie mniej obciążonego czopa osi,
 $2b$ (mm)-odległość między punktami przyłożenia sił działających na czopy osi,
 $2s$ (mm)-odległość między okręgami tocznymi kół zestawu,
 h_1 (mm)-wysokość położenia środka ciężkości (środku masy) ponad osią zestawu kołowego,
 h_c - wysokość środka ciężkości (środku masy) ponad osią zestawu kołowego,
 y_i (mm)-odległość między płaszczyzną obwodu tocznego i miejscem działania siły F_i ,
 $2s$ (mm)-odległość między okręgami tocznymi kół zestawu,
 r - promień toczny koła zestawu kołowego
 g - przyspieszenie grawitacyjne.

Przedstawiony układ sił wywołuje zginanie osi, natomiast siły pochodzące od rozruchu, hamowania, poślizgu w łukach wywołują skręcanie. W wyniku działania sił w obydwu kierunkach powstaje moment zredukowany, który wywołuje naprężenia rozciągające w osi zestawu kołowego. Moment zredukowany MR (lub wypadkowy) wyznacza się z zależności:

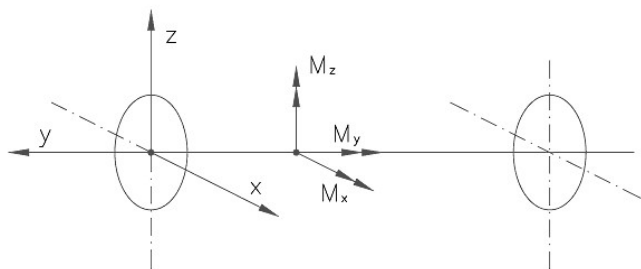
$$MR = \sqrt{MX^2 + MY^2 + MZ^2} \quad (2)$$

gdzie:

MX, MY – momenty gnące

MZ- moment skręcający.

Kierunki działania poszczególnych momentów sił MX, MY i MZ na tle układu współrzędnych są przedstawione na rys.2 , natomiast przykładowy przebieg momentu zredukowanego jest przedstawiony na rys.3.

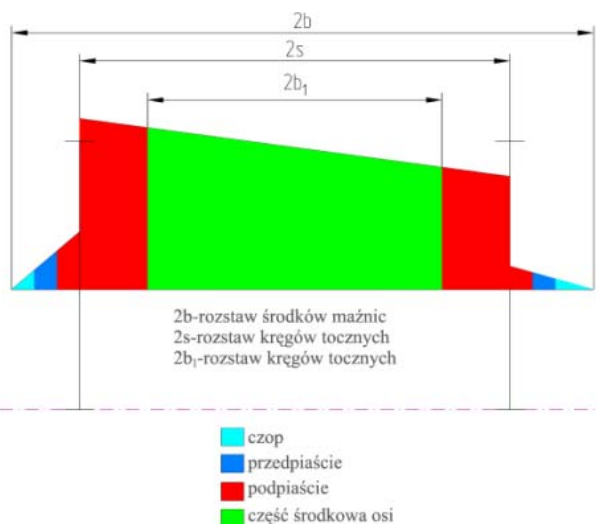


Rys.2. Momenty sił MX, MY i MZ na tle układu współrzędnych

Przyjmując, że momenty sił MX i MY są momentami gnącymi oraz MZ jest momentem skręcającym wyznaczono naprężenia obciążające poszczególne przekroje poprzeczne osi zestawu kołowego.

Naprężenia gnące σ_n mają następującą wartość, przyjmując że oś jest belką zginaną o przekroju kołowym o średnicy d:

$$\sigma_n = \frac{32\sqrt{MX^2 + MY^2}}{\pi d^3} \quad (3)$$



Rys. 3. Przykładowy przebieg momentu zredukowanego MR, obciążającego oś zestawu kołowego

Wartość naprężeń stycznych σ_t jest następująca, przyjmując że oś jest belką skręcaną pomiędzy dwoma przekrojami kołowymi:

$$\sigma_t = \frac{16MZ}{\pi d^3} \quad (4)$$

W wyniku działania momentów MX, MY i MZ powstają naprężenia główne σ_1 i σ_2 , które wyznacza się odpowiednio ze wzorów:

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_n + \sqrt{\sigma_n^2 + 4\sigma_t^2}}{2} \quad (5)$$

oraz

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_n - \sqrt{\sigma_n^2 + 4\sigma_t^2}}{2} \quad (6)$$

Ponieważ wartość bezwzględna naprężeń głównych jest większa (od 10 do 20 razy) niż naprężenia skręcające naprężenia zastępcze dla kontroli przyjętej wartości średnicy „d” wyznacza się ze wg hipotezy koła Mohra zgodnie ze wzorem:

$$\sigma = \sigma_1 - \sigma_2 = \frac{32}{\pi \cdot d^3} \sqrt{MX^2 + MY^2 + MZ^2} \quad (7)$$

Zgodnie z przyjętą metodyką dla osi trakcyjnych wg PN-EN 13104:2004 [13] oraz dla osi tocznych wg PN-EN 13103:2003 [12] naprężenia dopuszczalne są wyznaczone w oparciu o rzeczywistą granicę zmęczenia dla poszczególnych materiałów przy założeniu współczynnika bezpieczeństwa wynoszącego S=1,5 dla osi trakcyjnych oraz S=1,2 dla osi tocznych. Oś zestawu kołowego jest prawidłowo skonstruowana, jeśli jest spełniony warunek wytrzymałościowy dla każdego przekroju poprzecznego osi zestawów kołowych:

$$\sigma < \sigma_{dop} \quad (8)$$

gdzie:

σ_{dop} - naprężenia dopuszczalne w przekroju osi zestawu kołowego dla danego typu materiału.

Wartości dopuszczalnych naprężeń dla określonych stali tzn. EA1N (stal normalizowana), EA1T oraz EA4T (stale do ulepszania cieplnego) są podane w normie PN-EN 13261:2009 [14]. Wartości σ_{dop} są również podane z rozróżnieniem na osie pełne oraz osie drażone.

3.2. BADANIA DIAGNOSTYCZNE OSI ZESTAWÓW KOŁOWYCH PODCZAS EKSPLOATACJI

Stan osi zestawów kołowych jest sprawdzany za pomocą trzech metod diagnostycznych:

- badań wizualnych
- badań ultradźwiękowych
- badań magnetoskopowych.

Badania te wymagają wysokich kwalifikacji od personelu badawczego w zakresie obsługi urządzeń badawczych i oceny wyników badań.

Badania ultradźwiękowe w eksploatacji można podzielić na trzy grupy:

- badania uproszczone
- badania częściowo uproszczone
- badania szczegółowe.

Rodzaj badania ultradźwiękowego jest zależny od „dostępności” poszczególnych obszarów osi zestawu kołowego, co jest uzależnione np. od poziomu przeprowadzonych przeglądów, napraw rewizyjnych oraz głównych odpowiadających **poziomowi P1+P5**. Największe szanse na wykrycie ewentualnej wady, mającej wpływ na wytrzymałość zmęczeniową występują podczas badań szczegółowych, gdzie wszystkie obszary osi tzn.: czopy, przedpiaścia, podpiaścia (powierzchnie osadczcze dla kół bosych lub monoblokowych, tarcz hamulcowych i kół zębatych przekładni trakcyjnej), część środkowa osi są dostępne dla badającego. Badania szczegółowe osi wymagają jednak demontażu łożysk (razem z pierścieniami wewnętrznymi), kół bosych lub monoblokowych, tarcz hamulcowych i kół zębatych przekładni, co wymaga użycia poważnych sił stłaczania (większych o 20÷30% od sił wtlaczania). W takim przypadku jest konieczne użycie pras o zakresie siłowym co najmniej 2000kN. Ww. metoda badań szczegółowych może być przeprowadzana z uwagi na koszty oraz pracochłonność etapie wytwarzania osi oraz naprawy poziomu P5 odpowiadającemu naprawie głównej. Stłaczanie tych elementów należy wykonywać tylko w uzasadnionych przypadkach, gdyż za każdym razem istnieje niebezpieczeństwo uszkodzenia powierzchni osadczczych i konieczność przetaczania na mniejszą średnicę naprawczą, która jest ograniczona wymiarem kresowym. W związku z powyższym można wyciągnąć wniosek, że najczęściej przeprowadzanymi badaniami są badania ultradźwiękowe uproszczone lub częściowo uproszczone. Problem dostępności poszczególnych obszarów

osi zestawu kołowego jest jeszcze większy ze zrozmiałyh względów dla skuteczności badań wizualnych oraz badań magnetoskopowych. Tak więc można wnioskować, że dotychczas eksploatowane osie zestawów kołowych oraz obecnie produkowane przy bardzo wysokich wymaganiach produkcyjnych i odbiorczych powinny zapewnić bezpieczeństwo eksploatacyjne.

4. USZKODZENIA OSI ZESTAWÓW KOŁOWYCH

Jak wynika z długoletniej praktyki eksploatacyjnej pomimo postępującego procesu doskonalenia metod wytwarzania i odbiorczych oraz diagnostyki podczas eksploatacji ilość uszkodzonych osi podczas eksploatacji wzrasta, powodując niekiedy poważne wypadki i katastrofy kolejowe, związane z wysokimi stratami materialnymi, a w niektórych przypadkach powodując ofiary śmiertelne wśród pasażerów oraz personelu obsługującego. Złamanie osi w jakiegokolwiek strefie powoduje z reguły proces wykołowania, któremu trudno jest zapobiec ze względu na „gwałtowny przebieg zjawiska całkowitej utraty nośności osi”. Złamanie osi powoduje często uszkodzenia paru kilometrów toru zanim dojdzie do całkowitego wyhamowania pociągu przez maszynistę. Zjawisko to występuje często w pociągach towarowych. Przykłady przełomów zmęczeniowych różnych osi zestawów kołowych w wagonach towarowych przedstawiono na rys. 4, rys.5 i rys.6.



Rys. 4. Przełom zmęczeniowy czopa osi zestawu kołowego o wymiarach 120×179 mm



Rys.5. Przełom zmęczeniowy czopa osi zestawu kołowego o wymiarach 120×179 mm



Rys.6. Przełom zmęczeniowy czopa osi zestawu kołowego o wymiarach 120×179 mm

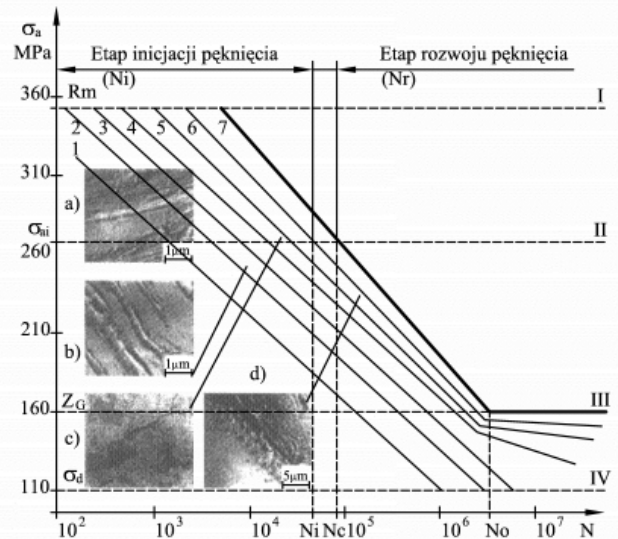
Bezpośrednimi przyczynami zmniejszenia wytrzymałości osi zestawów kołowych jest między innymi:

- fatalny stan zabezpieczenia antykorozyjnego takich fragmentów osi jak przedpiałcie oraz część środkowa osi
- uszkodzenia mechaniczne osi, co powoduje powstanie dodatkowego karbu i obniżenie wytrzymałości zmęczeniowej
- błędy montażowe łożysk tocznych w maźnicy, co powoduje zjawisko „zatarcia” łożysk i w końcowym efekcie ukłucie się czopa osi zestawu kołowego
- niewłaściwe przeprowadzenie badań ultradźwiękowych i zbyt pochopne zakwalifikowanie zestawu kołowego do eksploatacji.

5. PRZEGLĄD MOŻLIWOŚCI DIAGNOZOWANIA OSI ZESTAWÓW KOŁOWYCH ZE WZGLĘDU NA PĘKNIĘCIA ZMĘCZENIOWE

W świetle powyższych spostrzeżeń zawartych w p.4 niniejszego opracowania należy wziąć pod uwagę następane metody diagnozowania osi zestawów kołowych, aby można było wykryć wcześniej pęknięcie zmęczeniowe, zanim spowoduje to katastrofalne skutki dla bezpiecznej eksploatacji pojazdu szynowego i szeroko rozumianego bezpieczeństwa eksploatacyjnego transportu szynowego. W tym przypadku można skorzystać z doświadczeń zebranych przez inne środki transportu i gałęzie przemysłu. Liczne katastrofy lotnicze, statków morskich, platform wydobywczych ropy naftowej, pojazdów drogowych i maszyn roboczych, określają wagę problemu diagnozowania tych obiektów ze względu na pęknięcie zmęczeniowe z powodów technicznych, ekonomicznych i humanitarnych. W badaniach uszkodzeń dużej liczby pojazdów stwierdzono, że przyczyną 60% katastrof drogowych było spowodowanych pęknięciami zmęczeniowymi [6]. Ogólny efekt pęknięć zmęczeniowych w USA

zamykał się stratami 99 mld dolarów rocznie. Japońskie linie lotnicze wykazały, że koszt napraw urządzeń (w tym pęknięć zmęczeniowych) i obsługi swoich Boeingów 747 były porównywalne z ich ceną. Dlatego tak ważnym zagadnieniem staje się rozszerzenie badań diagnostycznych. Narzędzia diagnostyczne (w tym techniki pomiarowe) stosowane w diagnostyce zmęczeniowej można pogrupować w sposób przedstawiony w tabeli 1.



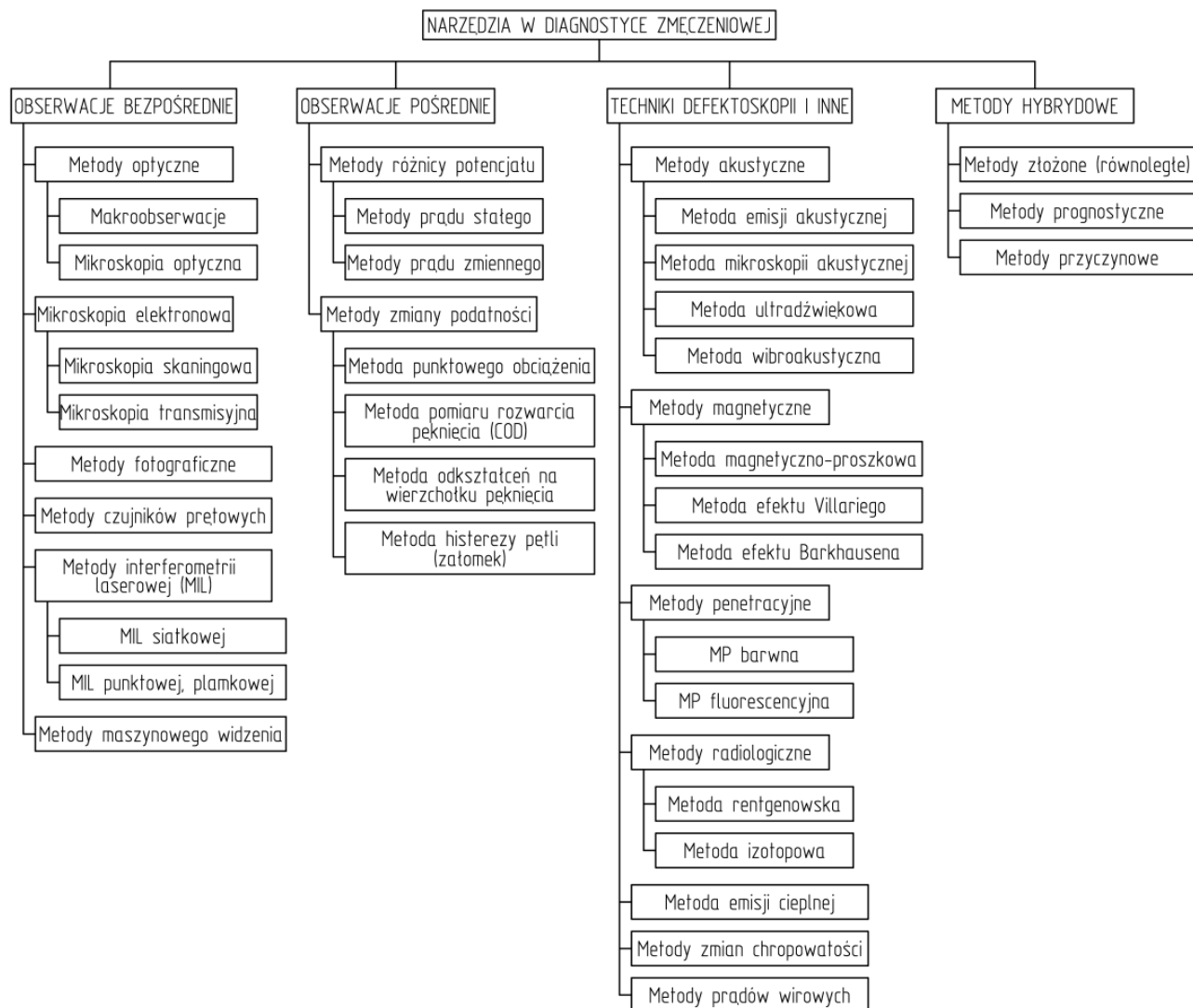
- a) linie i pasma ekstruzji
- b) linie i pasma mikropęknięć
- c) rozwiniętego pęknięcia w strefie znacznych odkształceń plastycznych
- d) strefa resztkowa
- I- zakres quasi-statycznego obciążenia
- II- zakres znacznych odkształceń plastycznych i dominujących odkształceń plastycznych (zmęczenie nisko-cykliczne)
- III- zakres małych odkształceń plastycznych i dominujących odkształceń sprężystych (wysokocykliczne zmęczenie)
- IV- zakres granicy zmęczenia ze śladowymi odkształceniami plastycznymi i zanikiem oznak zmęczenia

Rys.7. Schematyczne przedstawienie stref poszczególnych zjawisk zmęczeniowych na tle zarysu wykresu zmęczeniowego oraz obrazu makroskopowe odpowiadające tym strefom

W związku z powyższym należy rozważyć, jakie są możliwe dalsze przedsięwzięcia techniczne, które mogłyby zapewnić większe bezpieczeństwo eksploataowanych osi zestawów kołowych tocznych oraz trakcyjnych. Należy wziąć pod uwagę, że w przypadku zmęczenia celem diagnozowania jest trwałość obiektu z wyróżnieniem dwóch stanów:

- zdatności i niezdatności oraz
- stanów przejściowych –pośrednich, z których ważny jest stan graniczny.

Przez stan graniczny rozumie się stan niezdatności np. złom zmęczeniowy lub osiągnięcie krytycznej długości pęknięcia. Jako stan odniesienia (wzorcowy) dla obiektów diagnozowanych ze względu na pęknięcia zmęczeniowe jest stan początkowy obiektu dopuszczonego do eksploatacji, jako spełniającego określone



kryteria jakości. Problem diagnozowania może wynikać z rozwoju samego zjawiska zmęczenia materiału, które definiuje się jako złożony splot zjawisk zachodzących w materiałach, wywołanych obciążeniami zmiennymi w czasie i jest on zależny od tych obciążeń i czasu ich trwania. Zjawiska te powodują określone zmiany zmęczeniowe, które sumują się aż do pojawienia się pęknięcia zmęczeniowego elementu konstrukcyjnego. Z problematyką diagnozowania mają bezpośredni związek dwa etapy, czyli etap I zwany etapem inicjacji mikropęknięcia (związany z ilością cykli N_i) oraz etap II zwany etapem rozwoju makropęknięcia (związany z ilością cykli N_r). Etapy te są przedstawione na rys.7 [6].

Pole pod wykresem zmęczeniowym (linia 7) podzielono na 4 zakresy zależne od poziomu obciążeń zmiennych (zmęczeniowych) oraz na 7 stref odpowiadających występowaniu poszczególnych zjawisk zmęczeniowych,

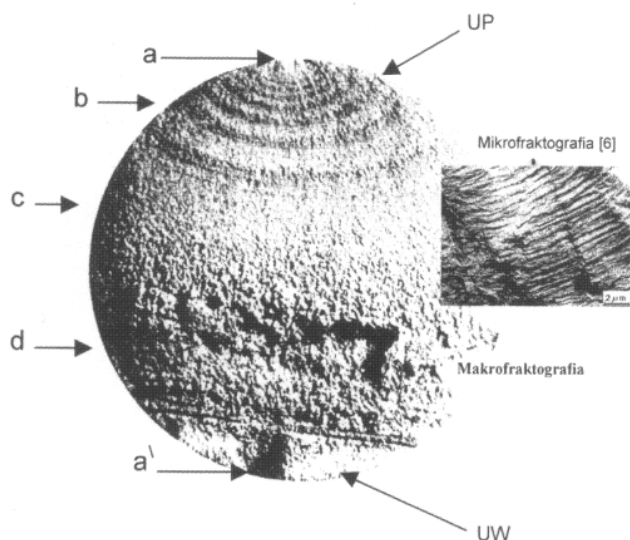
od pojawienia się pierwszych poślizgów od złomu zmęczeniowego. Opis poszczególnych zjawisk zachodzących w poszczególnych strefach od linii 1 do 7 podano w tabeli 2.

W procesie inicjacji pęknięcia złom zmęczeniowy jest problemem „lokalnym” (w skali mikro-objętości), natomiast złom zmęczeniowy w końcowej fazie rozwoju pęknięcia jest problemem „globalnym”. W pierwszym etapie procesu zmęczenia następstwem lokalnych odkształceń są zjawiska: emisji akustycznej EA, emisji ciepła EC, wzrostu chropowatości ΔR_a zmiany lokalnej sztywności materiału w wyniku procesów umocnienia lub osłabienia. Obserwacja wymienionych zjawisk może stanowić podstawę do oceny stopnia zaawansowania procesu zmęczenia. Opis rozwoju pęknięcia zmęczeniowego zamieszczonego w tabeli 2 oparto o rys.8.

Dane charakterystyczne dotyczące procesu zmęczeniowego pękania materiałów i konstrukcji oraz narzędzi diagnostycznych

Tabela 2

L.p.	Oznaczenie strefy 1	Stan procesu zmęczenia	Symptomy (wymiary charakterystyczne)	Narzędzia diagnostyczne	Uwagi
1.	0-1	Inkubacja poślizgów, w niektórych ziarnach niekorzystnie zorientowanych w stosunku do kierunku obciążenia	Wymiar charakterystyczny poślizgu $\approx 10/100$ nm Przyrost chropowatości $\Delta R_a = 0,1 \mu\text{m}$, Efekty: akustyczny, cieplny, magnetyczny, umocnienia lub osłabienia	Mikroskopia optyczna (MO) powiększona 400 razy Mikroskopia elektronowa: o transmisyjna pow. 10^4 razy o skaningowa	Obserwacja na powierzchni elementu
2.	1-2	Występowanie (wyrażnych) licznych poślizgów w pojedynczych ziarnach	Wymiar charakterystyczny poślizgu szerokość/wysokość $\approx 100/300$ nm Przyrost chropowatości $\Delta R_a = 0,3 \mu\text{m}$, Efekty j.w.	Profilografia – pomiar chropowatości Emisja akustyczna (EA-zliczanie zdarzeń akustycznych) Emisja cieplna (EC-termowizja) Zmiana pola magnetycznego (efekt Barkhausena EB i efekt Villariego EV) Obserwacja pętli histerezy naprężeniowo-odkształceniowej (ocena efektu osłabienia lub umocnienia)	
3.	2-3	Powstanie pasm poślizgów jako skupisk poślizgów w ziarnach, ekstruzje, intruzje	Wymiar charakterystyczny poślizgu szerokość/wysokość $\approx 1/10$ μm Przyrost chropowatości $\Delta R_a = 0,4 \mu\text{m}$ efekty j.w	j.w. ponadto: mikroskopia optyczna – pomiar długości mikropeknięć Lasersowa interferometria siatkowa (LES)-obserwacje kształtowania się strefy plastycznej	
4.	3-4	Pełny rozwój i łączenie się linii pasm i poślizgów w poszczególnych ziarnach, łączenie się pasm poślizgów w wielu ziarnach, strefa nukleacji mikropeknięć	Wymiar charakterystyczny mikropeknięcia α do $10 \mu\text{m}$. Przyrost chropowatości $\Delta R_a = 0,6 \mu\text{m}$. Kształtowanie się strefy odkształcenia plastycznego Efekty: j.w.	j.w. ponadto: elastooptyka-pokrycia elastooptyczne do oceny stref odkształceń plastycznych	Oznaczenia: α -długość mikropeknięcia w mm
5.	4-5	Rozwój wiązek pasm poślizgów w dużej liczbie ziaren, łączenie się pasm poślizgów w wielu ziarnach, strefa nukleacji mikropeknięć	Długość mikropeknięcia α do $10^2 \mu\text{m}$. Przyrost chropowatości $\Delta R_a = 0,8 \mu\text{m}$. Przyrost powierzchni odkształcenia plastycznego Efekty: j.w.		Oznaczenia: α -długość mikropeknięcia w mm a- długość makropeknięcia w mm
6.	5-6	Rozwój mikropeknięć	Długość mikropeknięcia α do $10^3 \mu\text{m}$. Przyrost chropowatości $\Delta R_a = 1,2 \mu\text{m}$ Mikropeknięcia w strefie odkształcenia plastycznego, efekty j.w.		
7.	6-7 a)	Łączenie się mikropeknięć, powstawanie makropeknięcia i jego rozwój do pełnego złomu elementu konstrukcyjnego Makropeknięcia w strefie ogniskowej	Przyrost chropowatości $\Delta R_a = 1,6 \mu\text{m}$ Długość makropeknięcia $a^2) \approx 1+5$ mm, przyrost makropeknięcia $\Delta a \approx 10^{-5} + 10^{-7}$ mm/cykl Efekty j.w.	j.w. poza: MET i MES ponadto: „maszynowe widzenie” (SMP-system monitorowania pęknięcia zmęczeniowego) Pomiar różnicy potencjału: prądu stałego, prądów wirowych Pomiar zmian podatności: -metoda punktowego obciążenia -metoda pomiaru rozwarcia pęknięcia -metoda odkształceń na wierzchołku pęknięcia Defektoskopia: ultradźwiękowa, wibroakustyczna, mikroskopii akustycznej, magnetyczno-proszkowa, penetracyjna barwna i fluorescencyjna, rentgenowska, izotropowa itd.	¹⁾ oznaczenie literowe zgodnie z rys.11 ²⁾ wartość przybliżona dla elementów konstrukcyjnych średniej wielkości np. dla rys..8 $\Phi_{elem1} = 100$ mm
	b)	Rozwój makropeknięcia w strefie złomu zmęczeniowego	Długość makropeknięcia $a^2) \approx 5+10$ mm Przyrost makropeknięcia $\Delta a \approx 10^{-5} + 10^{-3}$ mm/cykl Efekty j.w.		
	c)	Strefa przejściowa złomu zmęczeniowego	Długość makropeknięcia powyżej 50 mm Przyrost makropeknięcia Δa powyżej 10^{-3} mm/cykl Efekty j.w.		
	d)	Strefa reszkowa, całkowity złom	Cechy charakterystyczne złomu zmęczeniowego w skali makro: ognisko, linie zmęczeniowe, Strefa :złomu zmęczeniowego, przejściowa, reszkowa, w skali mikro: prążki zmęczeniowe	Makrografia- metody optyczne, pomiary długości, powierzchni Mikrografia: mikroskopia MET i MES	



a-strefa ogniskowa inicjacji „makro-pęknięcia”
 b- linie zmęczeniowe rozwijającego się „makro- pęknięcia”
 c-strefa przejściowa, cechująca się wzrostem rozwoju pęknięcia i ubytku przekroju
 d-strefa reszkowa cechująca się nagłą dekohezją elementu konstrukcyjnego

Rys.8. Makro- i mikropeknięcia złomu zmęczeniowego

Jak widać z przeprowadzonej analizy istnieje wiele metod i narzędzi, które mogą być zastosowane w diagnozowaniu pęknięć zmęczeniowych osi zestawów kołowych. W tabeli 3 przedstawiono orientacyjną ocenę punktową narzędzi stosowanych w diagnozowaniu obiektów technicznych ze względu na pęknięcia zmęczeniowe [6].

Dane charakterystyczne dotyczące procesu zmęczeniowego pęknięcia materiałów i konstrukcji oraz narzędzi diagnostycznych
 Tabela 3

L.p	Wyszczególnienie	Ocena punktowa				Uwagi
		Dokładność	Zastosowanie	Warunki diagnozowania	Koszt	
1.	I. Obserwacje bezpośrednie Makro-obszewacje	2	4	5	5	1) metoda stosowana głównie w ocenie stanu obiektu w etapie inicjacji pęknięcia zmęczeniowego
2.	Mikroskopia optyczna	2	4	3	4	
3.	Mikroskopia skaningowa	5	2	2	2	
4.	Mikroskopia transmisyjna	5	1	1	1	
5.	Mikroskopia czujników prętowych	4	3	4	3	
6.	Mikroskopia laserowej interferometrii siatkowej	5	1	2	1	
7.	Mikroskopia interferometrii laserowej płamkowej	4	2	3	2	
8.	Mikroskopia maszynowego widzenia	3	3	3	2	
9.	II. Obserwacje pośrednie Metoda różnicy potencjału prądu stałego	3	5	5	5	2) metoda stosowana głównie w ocenie stanu obiektu w etapie rozwoju pęknięcia zmęczeniowego
10.	Metoda prądów wirowych	4	5	5	5	
11.	Metoda zmiany podatności	3	2	3	3	
12.	III. Techniki defektoskopii Metoda emisji akustycznej	2	2	1	3	
13.	Metoda mikroskopii akustycznej	4	1	1	2	
14.	Metoda ultradźwiękowa	4	5	5	5	
15.	Metoda wibroakustyczna	2	3	4	3	
16.	Metoda magnetyczno-proszkowa	3	5	5	5	
17.	Metoda efektu Villariego	3	1	2	3	
18.	Metoda efektu Barhausena	3	2	3	4	
19.	Metody penetracyjne	4	5	4	5	
20.	Metoda rentgenowska	3	4	3	3	
21.	Metoda izotopowa	3	3	2	3	
22.	Metoda emisji ciepłej	3	2	3	4	
23.	Metoda przyrostu chropowatości	2	2	4	3	

Legenda do tabeli 3: ocena 1-punktowa wskazuje słabe spełnienie warunku, ocena 5-punktowa wskazuje spełnienie warunku w najwyższym stopniu (wysoka jakość, szerokie zastosowanie praktyczne, brak konieczności szczególnego przygotowania projektu, niski ogólny koszt prowadzenia badań).

Z przedstawionych ocen wynika, że część wyszczególnionych metod obserwacji i pomiaru dotyczy poszczególnych etapów procesu zmęczenia: do inicjacji pęknięcia, rozwoju pęknięcia lub całości procesu. W ocenie niektórych zjawisk zmęczeniowych dominuje jakościowa ocena stanu (pierwsze fazy procesu np. linie i pasma poślizgu). Niska ogólna punktacja niektórych metod nie obniża ich wartości w szczególnych zastosowaniach np. mikroskopia elektronowa jest podstawowym narzędziem oceny w tzw. diagnostyce przyczynowej.

Analiza doboru lub projektowania odpowiednich metod diagnozowania powinna uwzględniać następujące czynniki:

- warunki diagnozowania (w trakcie ruchu, przerwy obsługowych, czynniki środowiskowe, itp.)
- przewidywana postać i rodzaj pęknięć (powierzchniowe, skrośne, trajektorie i długość)
- możliwość zastosowania znanych metod i ich modyfikacji
- konieczność opracowania nowych
- określenie czasu i miejsca dokonania pomiarów, czas ich trwania
- ocenę pewności wykrycia pęknięć i dokładności ich pomiaru
- sposób opracowania wyników badań i wnioskowania odpowiednio do celu diagnozowania.

6. MACIERZ PRZYCZYNOWO-SKUTKOWA

Jednym z istotnych zabiegów poznawczych mogących przyczynić się do rozwoju metod diagnostycznych jest zbadanie związku przyczynowo-skutkowego dla wypadków kolejowych. Pozwala to na ustalenie węzłowych punktów w pojeździe szynowym, które powinny być diagnozowane. Związek przyczynowo-skutkowy dla wypadków kolejowych jest przedstawiony na rys.9 w postaci maczy [4].

Niniejsza macierz została opracowana w ramach projektu badawczego „Parametry decydujące o bezpieczeństwie eksploatacyjnym, które należy kontrolować w systemie kolejowym.” Po przeanalizowaniu związku przyczynowo-skutkowego wypadków kolejowych i łańcucha oddziaływania można dokonać optymalizacji stanów, uznanych jako awaryjne. Prowadzi to bezpośrednio do obniżenia kosztów ewentualnych uszkodzeń oraz zwiększenia bezpieczeństwa eksploatacyjnego i dyspozycyjności taboru oraz infrastruktury.

7. WNIOSKI

1. W wyniku przeprowadzonej analizy można stwierdzić, że istnieje pilna potrzeba rozwoju dalszych metod diagnostycznych zwiększających bezpieczeństwo eksploatacyjne układów biegowych pojazdów szynowych. Diagnostyka powinna być ukierunkowana na kontrolę poszczególnych elementów nośnych pojazdów szynowych na etapie ich wytwarzania, napraw i przeglądów okresowych oraz w trakcie eksploatacji. Niniejsza analiza nie kwestionuje zasadności obecnie stosowanych metod badawczych jak np. badania wizualne, badania magnetoskopowe czy badania ultradźwiękowe, które są uznane jako miarodajne przez przepisy krajowe (normy krajowe i branżowe, instrukcje badawcze itd.) i międzynarodowe raporty ORE/ERRI, karty UIC oraz normy europejskie PN-EN, opracowane przez Europejski Komitet Normalizacyjny.

2. Celowość rozwoju nowych metod diagnostycznych wykazano na podstawie osi zestawów kołowych, jako jednego z bardziej obciążonych elementów podczas eksploatacji. Oś zestawu kołowego jest jednym z najbardziej obciążonych i najbardziej newralgicznych miejsc pojazdu szynowego z punktu widzenia bezpieczeństwa eksploatacyjnego. Dlatego uznano za celowe, aby kontynuować rozwój niezawodności tego elementu stosując nowe metody diagnostyczne. Przy wytypowaniu tego elementu kierowano się zasadą, że potencjalne pęknięcia osi, powodujące utratę ich nośności przyczyniają się do katastrof kolejowych, powodujących znaczące straty materialne, zagrożenie zdrowia i życia, a niekiedy i ofiary śmiertelne wśród pasażerów oraz obsługi. Należy brać pod uwagę, że na niezawodność osi zestawu kołowego mają wpływ współpracujące elementy jak np. węzły łożyskowe. Osie projektowane wg metodyki przedstawionej w normach europejskich PN-EN 13103:2003 [(osie toczne) [12] oraz PN-EN 13104:2004 (osie trakcyjne) [13] wykazują prawidłową wytrzymałość zmęczeniową. Naprężenia dopuszczalne są wyznaczone w oparciu o wyznaczoną eksperymentalnie granicę zmęczenia obrotowego R_n (dla próbek gładkich) oraz R_{FE} (dla próbek z karbem) ze współczynnikiem bezpieczeństwa $S=1,2$ (osie toczne) oraz $S=1,5$ (osie trakcyjne). Granica zmęczenia została wyznaczona na drodze doświadczalnej za pomocą badań stanowiskowych w zakresie do 10^7 cykli. W takim przypadku można uznać, że wyznaczona granica zmęczenia jest nieograniczoną granicą zmęczenia lub wytrzymałością trwałą

Przyczyna	Czynnik																																																												
	Wykolejenie	Przeżrane łożyska w korpusie maźnicy	State hamowania	Uszkodzona blacha przeciwwiskrowa	Uszkodzone elementy hamulca	Pęknięcie osi	Pęknięcie czopa osi	Pęknięcie koła	Uszkodzona powierzchnia taczna/ płaskie miejsca	Uszkodzone obrzeże	Uszkodzone zawieszenie i jego elementy	Uszkodzona rama wózka	Przesunięcie ładunku na skos podczas jazdy pojazdu	Przesunięcie ładunku	Przeladowanie	Naruszenie skrajni budowli	Uszkodzone drzwi lub łuki ładunkowe	Uszkodzone mocowanie ładunku	Niedostateczne smarowanie zderzaków	Uszkodzone zderzaki	Brak właściwej współpracy pomiędzy zderzakami ze względu na różnice wysokości	Uszkodzone urządzenia elektryczne pojazdu	Pęknięty odbierak prądu	Ogień na/w pojeździe	Obiekty na torze/w rejonie toru powodujące uszkodzenia	Zmiejszenie lub zwiększenie prześwitu toru	Osładowanie toru	Uszkodzona powierzchnia szyny	Uszkodzenia na wewnętrznej powierzchni szyny	Zużyta szyna	Materiał szyny poddany procesowi starzenia	Pęknięcia szyny	Uszkodzona podkładka elastyczna pośrednia	Uszkodzone mocowanie szyny	Podkład drewniany poddany procesowi starzenia	Pęknięcia w podkładzie betonowym	Niedopuszczalna jakość toru																								
1. Wykolejenie						1	2	3	4																																																				
2. Przeżrane łożyska w korpusie maźnicy							9																																																						
3. State hamowanie	11																																																												
4. Uszkodzona blacha przeciwwiskrowa																																																													
5. Uszkodzone elementy hamulca			15																																																										
6. Pęknięcie osi	16																																																												
7. Pęknięcie czopa osi	17																																																												
8. Pęknięcie koła	18																																																												
9. Uszkodzona powierzchnia taczna/ płaskie miejsca								19	20																																																				
10. Uszkodzone obrzeże	22																																																												
11. Uszkodzone zawieszenie i jego elementy	23							24			25																																																		
12. Uszkodzona rama wózka	26						27																																																						
13. Przesunięcie ładunku na skos podczas jazdy pojazdu	28																																																												
14. Przesunięcie ładunku																																																													
15. Przeladowanie								32	33	34	35	36	37																																																
16. Naruszenie skrajni budowli	40																																																												
17. Uszkodzone drzwi lub łuki ładunkowe																		42	43																																										
18. Uszkodzone mocowanie ładunku																																																													
19. Niedostateczne smarowanie zderzaków																																																													
20. Uszkodzone zderzaki	49																																																												
21. Brak właściwej współpracy pomiędzy zderzakami ze względu na różnice wysokości	52																																																												
22. Uszkodzone urządzenia elektryczne pojazdu																																																													
23. Pęknięty odbierak prądu																																																													
24. Ogień na/w pojeździe																																																													
25. Obiekty na torze/w rejonie toru powodujące uszkodzenia	54																																																												
26. Zmiejszenie lub zwiększenie prześwitu toru	55																																																												
27. Osładowanie toru	56																																																												
28. Uszkodzona powierzchnia szyny																																																													
29. Uszkodzenia na wewnętrznej powierzchni szyny																																																													
30. Zużyta szyna																																																													
31. Materiał szyny poddany procesowi starzenia																																																													
32. Pęknięcia szyny	66																																																												
33. Uszkodzona podkładka elastyczna pośrednia																																																													
34. Uszkodzone mocowanie szyny																																																													
35. Podkład drewniany poddany procesowi starzenia																																																													
36. Pęknięcia w podkładzie betonowym																																																													
37. Niedopuszczalna jakość toru	73																																																												

Rys.9. Związek przyczynowo-skutkowy w postaci matrycy dla wypadków kolejowych wg [4]

na zmęczenie. Zmniejszenie rzeczywistej granicy zmęczenia w trakcie eksploatacji odbywa się w wyniku czynników, które nie są symulowane na stanowisku do badań zmęzeniowych. Do takich czynników można zaliczyć: nadmierne obciążenia eksploatacyjne, korozję powierzchni, uszkodzenia mechaniczne, zwiększające działanie karbu „kształtu” a tym samym koncentrację naprężeń z jednej strony a drugiej strony obniżenie efektywnej granicy zmęczenia. Metoda zwiększania bezpieczeństwa kursującego taboru, w tym osi zestawów kołowych poprzez wyznaczanie limitu wiekowego jest nieuzasadniona z punktu widzenia technicznego. Wiek zestawów kołowych nie jest w żaden sposób powiązany z ilością cykli obciążeń, które rzeczywiście działają na osi zestawu kołowego i decydują o zmęczeniu materiału. Decydującym kryterium o kwalifikacji osi do dalszej eksploatacji

jest stan techniczny osi zestawu kołowego. Aby precyzyjnie określić stan zestawu

- [4] Schöbel A., Walter M.: *Sicherheitsrelevante Parameter im Eisenbahnwesen. Eisenbahntechnische Rundschau Nr. 12/2009.*
- [5] Starczewska M.: *Lasery pod kołami. Kurier PKP. 3/20/01.2008.*
- [6] Szala J.: *Przegląd możliwości diagnozowania obiektów technicznych ze względu na zmęczeniowe pękanie. Przegląd mechaniczny Nr 4/2003.*
- [7] Karta UIC 510-3: *Wagony towarowe. Badania stanowiskowe ram 2 i 3 osiowych wózków wagonów towarowych. 1-sze wydanie z 1.01.1989, nowy nakład 1.07.1994 oraz errata z 1.07.1997*
- [8] Karta UIC 515-3: *Pojazdy szynowe. Wózki i układy biegowe. Metoda do obliczeń osi zestawów kołowych.*
- [9] Karta UIC 515-4: *Pojazdy kolejowe dla transportu pasażerów. Wózki toczne. Układy biegowe. Badania wytrzymałościowe ram wózków. 1-sze wydanie z 1.01.1993.*
- [10] Karta UIC 615-4: *Pojazdy trakcyjne. Wózki i układy biegowe. Badania wytrzymałościowe konstrukcji ram wózków. 2-gie wydanie z 02.2003.*
- [11] Karta UIC 893: *Warunki techniczne dla dostawy blach na płyty prowadnicowe ze stali manganowej. 2-gie wydanie z 06.2004.*
- [12] PN-EN 13103:2003: *Kolejnictwo. Zestawy kołowe i wózki. Osie zestawów kołowych tocznych. Zasady konstrukcji.*
- [13] PN-EN 13104: 2004: *Kolejnictwo. Zestawy kołowe i wózki. Osie zestawów kołowych napędnych. Zasady konstrukcji.*
- [14] PN-EN 13261:2008: *Kolejnictwo. Zestawy kołowe i wózki. Osie. Wymagania dotyczące wyrobu.*
- [15] PN-EN 14363: 2005 (U): *Kolejnictwo. Badania własności dynamicznych przed dopuszczeniem pojazdów szynowych. Badania własności biegowych i próby stacjonarne.*
- [16] pr EN 13749:2005: *Kolejnictwo. Zestawy kołowe i wózki. Metoda określenia wymagań konstrukcyjnych dla ram wózków.*
- [17] Raport ORE/ERRI B55 Rp.8: *Bezpieczeństwo przejazdu wagonów towarowych podczas przejazdu przez tory wichrowate (niem. „Sicherheit gegen Entgleisen von Güterwagen in Gleisverwindungen”). Utrecht, kwiecień 1983.*
- [18] Raport ORE/ERRI B136/Rp.11/D. *Zestawy kołowe z nasadzonymi łożyskami tocznymi. Konstrukcja, utrzymanie i standaryzacja. Obliczenie osi zestawów kołowych dla wagonów towarowych i osobowych. Utrecht, kwiecień 1979.*
- [19] *Rozporządzenie Ministra Infrastruktury Nr 1771 z dnia 12.10.2005 w sprawie ogólnych warunków technicznych eksploatacji pojazdów kolejowych. Dziennik Ustaw Nr 212.*