

Prof. dr hab. inż. Henryk Bałuch
Instytut Kolejnictwa
Mgr inż. Julian Bałuch
Centrum Diagnostyki PLK S.A.

PROGNOZOWANIE PĘKNIĘĆ SZYN

SPIS TREŚCI

1. Wstęp
2. Metody prognozowania
3. Pęknięcia szyn w latach 2006–2010
4. Pęknięcia szyn w spoinach termitowych
5. Możliwe błędy w prognozowaniu pęknięć szyn i ich wskaźniki
6. Wnioski

STRESZCZENIE

Analiza pęknięć szyn umożliwia ocenę zagrożeń istniejących w nawierzchni kolejowej i stanowi istotny czynnik określający jej stan w Polsce. Zdecydowana większość pęknięć szyn występuje w Polsce w okresie niskich temperatur. Największą grupę stanowią pęknięcia w spoinach termitowych. Liczba pęknięć szyn w przeliczeniu na 1 km stanowi kryterium wymian ciągłych. Na innych kolejach przyjmowane są wskaźniki określające ryzyko wystąpienia zdarzeń niepożądanych. Artykuł charakteryzuje metody prognozowania, przedstawia błędy, jakie można w nich popełnić, pokazuje wahania pęknięć szyn w ujęciu relatywnym, zawiera porównania wskaźników przyjmowanych w Polsce i w innych krajach oraz wnioski zmierzające do zmniejszenia zagrożeń, jakie stwarzają pęknięcia szyn.

1. WSTĘP

Obserwacje i pomiary nawierzchni kolejowej powinny służyć nie tylko do podejmowania decyzji odnoszących się do czasu, w jakim są wykonywane, lecz również stanowić podstawy prognozowania rozwoju obserwowanych zjawisk. Wśród różnych zagrożeń występujących w nawierzchni kolejowej, złamania i pęknięcia szyn są jednym z najważniejszych¹. Rejestracja wszystkich pęknięć stwarza możliwość śledzenia ich trendów w skali całej sieci kolejowej oraz na dowolnie wybranej linii.

¹ Oba te rodzaje uszkodzeń szyn w dalszej części artykułu będą nazywane pęknięciami szyn

Wnioski wynikające z analiz pęknięć szyn mają trojakić znaczenie:

- 1) umożliwiają śledzenie tendencji zmiany zagrożeń w kolejnych latach, co w budowanych obecnie systemach bezpieczeństwa, odpowiadających dyrektywom unijnym, ma dość istotne znaczenie,
- 2) stanowią jeden ze znaczących symptomów wskazujących na zaostrzenie lub łagodzenie narosłych przez lata niedoborów w zakresie wymian nawierzchni,
- 3) umożliwiają porównanie ryzyka wykolejeń z powodu pęknięć szyn, przyjmowanego na innych kolejach, ze wskaźnikami wynikającymi z pewnych przyjmowanych wskaźników w Polsce.

Znajomość statystyk pęknięć szyn jest doceniana na wielu kolejach, m.in. w USA [25]. W latach 1998–2008 roczna liczba wykolejeń pociągów w USA z powodu uszkodzeń szyn przekraczała 300, co kosztowało rocznie – według oficjalnych statystyk administracji rządowej – ponad 70 mln USD, a w latach 2006 i 2007 przekraczała 400. Według nieoficjalnych danych, roczne koszty wykolejeń spowodowanych pęknięciami szyn przekraczały 140 mln USD. Na głównych liniach do przewozów towarowych, jedno pęknięcie rocznie przypada w USA na 10 mil toru (1 mila = 1609 m), natomiast na liniach o ruchu pasażerskim z prędkością 125 mil/h (200 km/h) i więcej, jedno pęknięcie zdarza się raz na rok na 1000 mil.

Pęknięcia szyn, obok regularności ruchu pociągów stanowią ważną charakterystykę kolei brytyjskich. Tymi wskaźnikami posłużono się charakteryzując przeobrażenia, jakie nastąpiły tam w latach 2000–2010. W roku 2000, tj. w roku głośnej katastrofy pod Hadfield pękło w Anglii 988 szyn, a regularność wynosiła 79%. Po dziesięciu latach, w wyniku nie tylko znacznie zwiększonych nakładów na utrzymanie dróg kolejowych, lecz również konsekwentnie prowadzonej diagnostyki pod hasłem *mierzyć, przewidywać, zapobiegać* liczba pęknięć szyn zmalała do 152, a regularność ruchu pociągów wzrosła do 94% [16, 23].

2. METODY PROGNOZOWANIA

W kosztach cyklu życia dróg kolejowych rozróżnia się 4 fazy:

- 1) planowania i projektowania,
- 2) budowy,
- 3) eksploatacji (utrzymania),
- 4) utylizacji.

Z grubsza ocenia się, że relatywne koszty tych faz wynoszą odpowiednio: 5, 28, 65 i 2% [18]. Nie ulega więc wątpliwości, że najdroższą i najdłużej trwającą fazą jest faza eksploatacji. Prognozowanie zachodzących w niej procesów powinno być jednym z podstawowych narzędzi zarządzania.

Istnieje co najmniej kilka definicji prognozowania. W książce [7] prognozowaniem nazywa się racjonalne, naukowe przewidywanie przyszłych zdarzeń. Podobnie definiuje

prognozowanie współautor książki [20], rozumiejąc pod tym pojęciem racjonalne, oparte na podstawach naukowych, przewidywanie kształtowania się zjawisk i procesów w przyszłości.

Wynikiem prognozowania jest prognoza, tj. sąd o przyszłych stanach zjawisk i zdarzeń. Sąd ten powinien mieć następujące cechy:

- odnosić się do określonej przyszłości,
- umożliwiać jego weryfikację empiryczną,
- charakteryzować się akceptowalnym poziomem niepewności.

Prognozy dotyczące nawierzchni kolejowej mogą być prognozami ilościowymi lub jakościowymi. Przykładem prognoz ilościowych są prognozy pęknięć szyn. Ze względu na horyzont czasowy, prognozy dzielą się na krótko-, średnio- i długookresowe, przy czym granice czasu są tu bardzo zróżnicowane i zależne od przewidywanego procesu. Prognozę pęknięcia szyn w ciągu następnego roku można zakwalifikować do prognoz średnioterminowych, a prognozę ciągłych wymian nawierzchni w ciągu 10 lat – do długoterminowych. Dla kontrastu warto jednak dodać, że długookresową prognozą w meteorologii jest prognoza odnosząca się do 1 miesiąca.

W prognozowaniu zagadnień dotyczących dróg kolejowych można zastosować kilka metod, takich jak: analiza szeregów czasowych, metoda prognozowania przyczynowo-skutkowego, prognozowanie przez analogię i prognozowanie metodami heurystycznymi. Prognozowanie przyczynowo-skutkowe występuje w przypadku, gdy nie ma możliwości budowy modelu teoretycznego, są natomiast dane historyczne. Metody prognozowania przez analogię opierają się na obserwacjach podobnych procesów i zjawisk, natomiast metody heurystyczne – na opiniach ekspertów, intuicji i doświadczeniu.

Jakość prognozy ilościowej daje się niekiedy sprawdzić zanim jeszcze zaistnieje stan prognozowany. Można to osiągnąć, porównując zmiany na zbiorze danych, które nie były jeszcze wykorzystane w budowie modelu. Trafność prognoz jakościowych można sprawdzić jedynie przez porównanie stanu prognozowanego ze stanem, który zaistniał w rzeczywistości. W każdej metodzie prognozowania bardzo duże znaczenie mają źródła danych historycznych, które mogą być mierzalne (ilościowe) lub niemierzalne (jakościowe). W pewnych warunkach, zmiennym niemierzalnym można przyporządkować liczby, np. stopień uszkodzeń rozjazdów ($1 \div 5$) lub wskaźnik ryzyka wybożenia toru bezстыkowego ($1 \div 100$). Na tych liczbach nie można jednak wykonywać działań arytmetycznych. Ważną cechą danych jest również ich porównywalność.

Dane dotyczące pęknięć szyn mają charakter liczbowy (liczby pęknięć) i opisowy (m.in. typy i rodzaje wad). Do prognozowania pęknięć należy wykorzystać jedno i drugie. Najważniejsze znaczenie mają tu jednak szeregi czasowe. Trafność prognoz dotyczących zmian nasilania się lub zmniejszania pęknięć zależy w dużym stopniu od długości szeregu czasowego. W przypadku komputerowej rejestracji pęknięć w skali całej sieci PLK S.A. kresem dolnym tego szeregu jest 2006 rok.

Oprócz prognozowania wyrażanego liczbą pękniętych szyn na całej sieci kolejowej lub wybranych liniach, znane są systemy komputerowe ułatwiające przewidywanie pęk-

nięć szyn na krótkich odcinkach toru, scharakteryzowanych parametrami konstrukcyjnymi i eksploatacyjnymi. Taki system opracowano w USA [8, 9], wychodząc z założenia, że zwiększenie zdolności przewidywania pęknięć ma znaczenie ekonomiczne i zwiększające bezpieczeństwo. Stwierdzenie to oparto na statystykach wykazujących, że spośród 3504 wykolejeń, które wydarzyły się w latach 1994–1998 w torach głównych, podstawową przyczyną były pęknięcia szyn i uszkodzenia złączy (ponad 600 wykolejeń), w których była też największa średnia liczba wagonów przypadających na jedno wykolejenie (ponad 11)². Celem tego systemu jest określenie okoliczności, w których najprawdopodobniej mogą wystąpić pęknięcia. Analizowano 3676 przypadków, z czego połowa dotyczyła miejsc, w których wystąpiły pęknięcia.

W każdym przypadku analizie poddano 11 parametrów:

- 1) wiek szyny,
- 2) masa szyny,
- 3) promień łuku,
- 4) prędkość,
- 5) średnia masa jednego wagonu,
- 6) średnia masa jednego wagonu z uwzględnieniem współczynnika dynamicznego,
- 7) pochylenie podłużne,
- 8) natężenie przewozów,
- 9) liczba osi w ciągu roku,
- 10) istnienie rozjazdów w torach głównych,
- 11) istnienie złączy izolowanych.

Wszystkie zmienne, oprócz dwóch ostatnich, traktowano jako ciągłe. Obecność dwóch ostatnich kodowano jako 1, ich brak zaś – jako 0.

Komentarza wymaga uwzględnienie lub pominięcie pewnych parametrów, które w polskich warunkach mają istotne znaczenie. Brak rodzaju podkładów i przytwierdzeń wynika stąd, że w USA podstawową konstrukcją na analizowanych liniach jest tor ułożony na podkładach drewnianych z przytwierdzeniem szyn za pomocą haków. Rozjazdy uwzględniano, biorąc pod uwagę, że ich istnienie może prowadzić do koncentracji sił podłużnych.

Mając te parametry, wykonywano wiele prób, stosując regresję wielokrotną z różnym zestawem parametrów. W wyniku tych prób odrzucono wielkości występujące pod numerami 4, 6, 7 i 11. Do równania regresji wielokrotnej, ku zaskoczeniu autorów, weszła wielkość 6 ze znakiem ujemnym³.

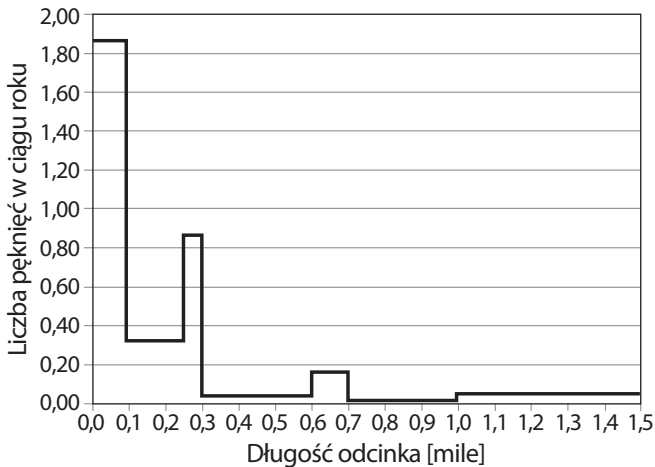
Opracowany model zastosowano na liniach o łącznej długości 23 750 mil (38 214 km), dzieląc początkowo tę długość na odcinki o długości 0,1 mili. Następnie wykonano

² Pęknięcie złączy na kolejach USA stanowi duży problem, zarówno ze względu na bezpieczeństwo, jak i duże koszty. Z tych powodów skonstruowano tam i wprowadzono do eksploatacji specjalny pojazd defektoskopy do badań złączy [7].

³ Z licznych doświadczeń Instytutu Kolejnictwa (dawne CNTK) wynika, że w regresji wielokrotnej często zdarza się, że pewne wielkości mają znaki ujemne, wbrew fizycznemu znaczeniu. Zapanowanie nad tymi znakami, zdaniem licznych matematyków, nie jest możliwe.

agregację odcinków o zbliżonych cechach, co doprowadziło do uzyskania wykresów przedstawiających hipotetyczne pęknięcia szyn w ciągu roku (rys. 1).

System prognozowania pęknięć szyn, oparty na powiązaniu sieci bayesowskich z teorią grafów, został opracowany dla metra paryskiego (RATP) [5].



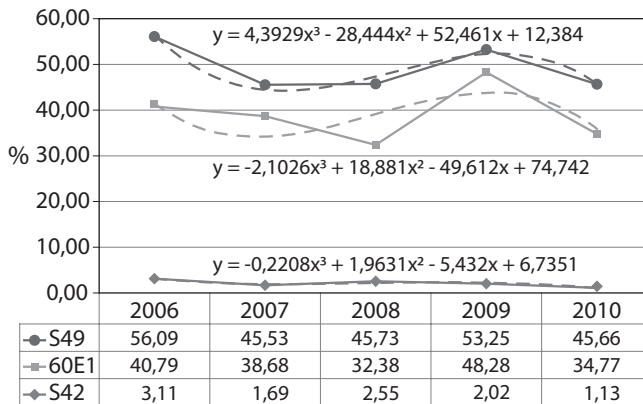
Rys. 1. Prognozowana liczba pęknięć szyn na wybranym odcinku linii o długości 1,5 mili [8]

3. PĘKNIĘCIA SZYN W LATACH 2006–2010

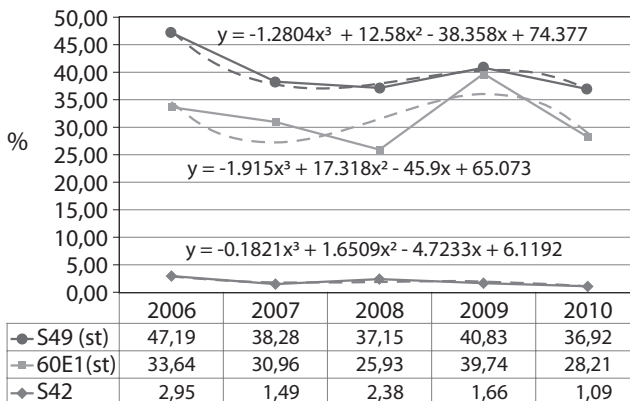
Bezwzględne liczbowe wartości pęknięć szyn nie są w Polsce publikowane, więc przeprowadzone analizy będą przedstawione w ujęciu relatywnym, tj. przy założeniu, że wszystkie pęknięcia szyn na sieci PLK S.A. w roku 2006 stanowią 100%. Pewne rozważania metodyczne, w których jest konieczne operowanie liczbami pęknięć szyn, z tego samego powodu zostaną zilustrowane przykładami z wyimaginowanej sieci, nie odpowiadającej sieci PKP. Podobnie jak w pracy [21], wyniki statystyczne przedstawiono w odniesieniu do wszystkich pęknięć (rys. 2) oraz do pęknięć z wyłączeniem grupy dominującej, tj. pęknięć poprzecznych w spoinach termitowych, oznaczonych w katalogu wad [15] numerem 421 (rys. 3).

W ciągu ostatnich pięciu lat ogólna liczba pęknięć szyn typu 60E1 (UIC 60) i 49E1 (S49) ulegała dość dużym wahaniom i w latach 2007 oraz 2008 zmalała prawie o 20% (rys. 2). Rok 2009 przyniósł wzrost pęknięć, które w sumie przekroczyły poziom z roku 2006 o 3,55%. Jedynie pęknięcia szyn typu S42 nie zwiększyły się, ale ich liczba stanowiąca około 2% wszystkich pęknięć nie jest znacząca.

W roku 2010 nastąpił duży spadek pęknięć we wszystkich typach szyn. Ich całkowita liczba odpowiada 81,6% pęknięć, które wystąpiły w roku 2006 i była tylko o 1% większa w porównaniu z rokiem 2008, w którym tych pęknięć było najmniej.



Rys. 2. Pęknięcia szyn z podziałem na typy (wszystkie rodzaje pęknięć)



Rys. 3. Pęknięcia szyn z podziałem na typy z wyłączeniem pęknięć poprzecznych w spoinach termitowych (wada 421)

Pomijając na razie przyczynę załamania się spadkowego trendu pęknięć szyn w 2009 roku, warto zwrócić uwagę na strukturę pęknięcia szyn według ich typów. Z rysunków 2 i 3 wynika, że częściej pękają szyny typu S 49 niż UIC 60⁴, ale jednocześnie wahania w pękaniu szyn typu UIC 60 są większe niż w szynach typu S 49, gdyż w 2009 roku wzrost liczby pęknięć w szynach typu UIC 60 wyniósł prawie 16%, podczas gdy w szynach typu S 49 – tylko 7,5%.

Wytlumaczeniem tej różnicy może być tylko hipoteza związana z wpływem temperatury na pęknięcie szyn. Niska temperatura nie jest przyczyną pęknięcia szyn, jednak stanowi warunek sprzyjający, który ma bardzo duży wpływ na pęknięcie. Różnica między temperaturą neutralną i temperaturą ujemną szyn w zimie, powoduje większe siły roz-

⁴ Biorąc pod uwagę wiek pękających szyn, nazywamy je tak, jak nazywały się one w latach, gdy były układane.

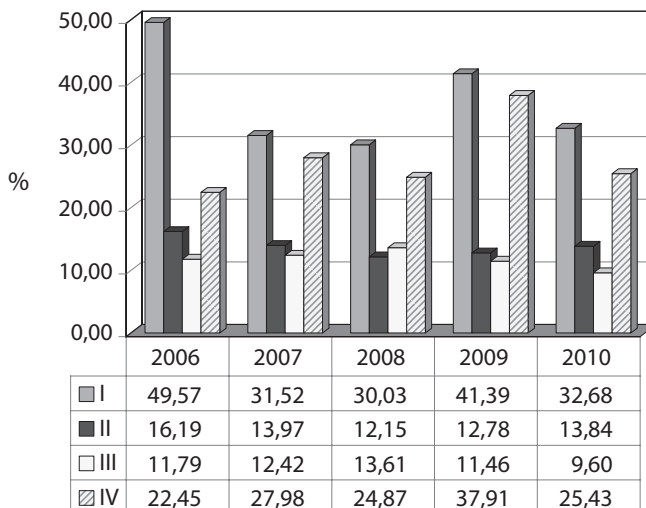
ciągające w szynach UIC 60 niż w szynach S 49. To więc może być przyczyną większych wahań pęknięć szyn typu UIC 60 w porównaniu z szynami S 49.

Hipotezę tę uzasadnia dodatkowo rozkład pęknięć szyn w poszczególnych kwartałach (rys. 4). W roku 2006 blisko połowa szyn pękła w I kwartale, w latach 2007 i 2008 w kwartałach z temperaturami ujemnymi, tj. w I i IV, pęknięcia również przewyższały wyraźnie te, które wystąpiły w kwartałach II i III, lecz przewaga ta nie była już tak duża. Wzrost pęknięć w 2009 roku był spowodowany głównie pęknięciami w kwartałach I i IV, a spadek pęknięć w roku 2010 też jest spowodowany zmniejszeniem pęknięć w tych dwóch kwartałach. Warto też odnotować, że w ciągu pięciu lat objętych statystyką, pęknięcia w II i III kwartałach utrzymują się prawie na jednakowym poziomie i nie przekraczają 25% wszystkich pęknięć w danym roku.

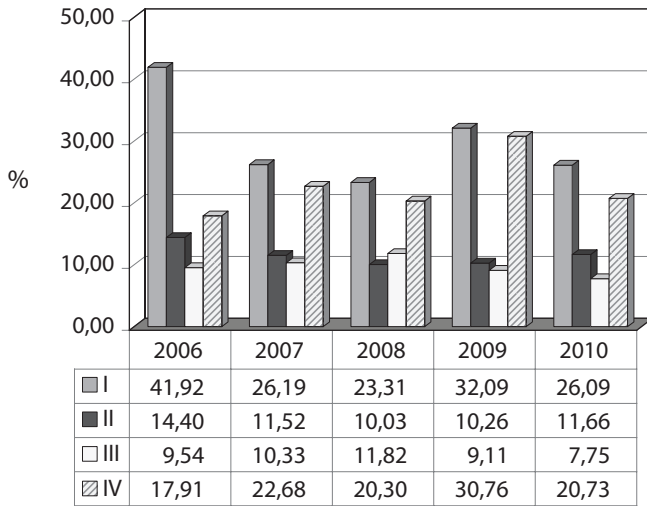
Pęknięcia szyn typu S 42, kształtujące się na poziomie 2% rocznie, wykazują małe wahania i w znaczeniu statystycznym nie stanowią problemu. Każde jednak pęknięcie szyn może doprowadzić do wypadku, a zatem i tych pęknięć – chociaż jest ich niewiele, podobnie jak niewiele jest szyn lekkich w torach PKP – nie można lekceważyć.

W grupie pęknięć szyn bez wady 421 (rys. 3), potwierdzają się prawidłowości stwierdzone na rysunku 2, a więc duży przyrost pęknięć szyn typu UIC 60.

Potwierdzeniem wpływu niskich temperatur na pękanie szyn są histogramy ich pęknięć w poszczególnych kwartałach (rys. 4). W 2006 roku prawie 50% wszystkich pęknięć wystąpiło w I kwartale, w 2009 roku zaś ponad 79% pęknięć wydarzyło się w I i IV kwartałach. Pęknięcia szyn w II i III kwartałach wynoszą łącznie od 24% do 28%. W grupie pęknięć szyn bez wady 421 (rys. 5) różnice są nieco mniejsze, ale i tu pęknięcia w kwartałach II i III nie przekroczyły 23%, a w 2009 roku nie przekroczyły nawet 20%.

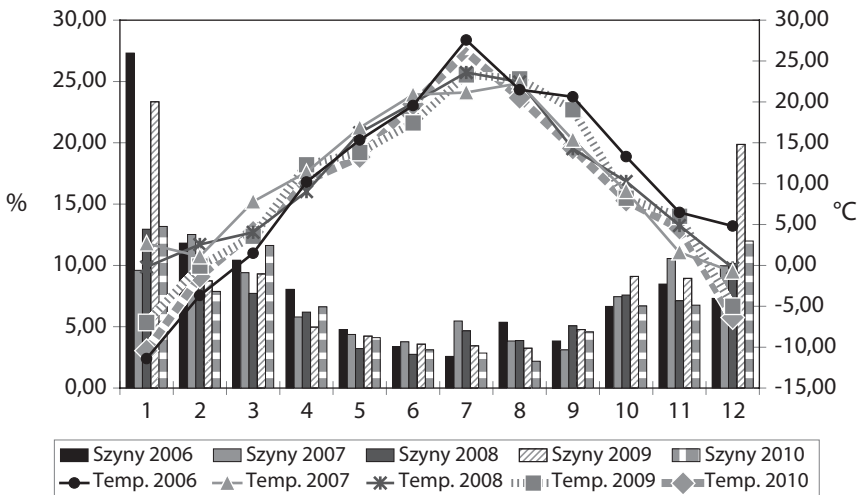


Rys. 4. Pęknięcia szyn (wszystkie rodzaje) w ujęciu kwartalnym



Rys. 5. Pęknięcia szyn, z wyłączeniem pęknięć poprzecznych w spoinach, w ujęciu kwartalnym

Wyjaśnienie dominującej liczby pęknięć szyn w I kwartale 2006 roku znajdujemy na rysunku 6, ukazującym średnią wartość temperatur zanotowanych przy każdym pęknięciu. W styczniu 2006 roku ta średnia wynosiła $-11,4^{\circ}\text{C}$, w lutym $-4,97^{\circ}\text{C}$. W styczniu pękło prawie 28% wszystkich szyn, a w lutym 12%. W styczniu 2009 roku średnia temperatur odnotowanych przy poszczególnych pęknięciach wynosiła $-6,96^{\circ}\text{C}$, w grudniu zaś $-5,02^{\circ}\text{C}$. W obu tych miesiącach pękło 38% wszystkich szyn w tym roku. Silnymi mrozami w styczniu i grudniu 2009 roku można więc częściowo tłumaczyć załamanie się spadkowego trendu pęknięć szyn w tym roku.

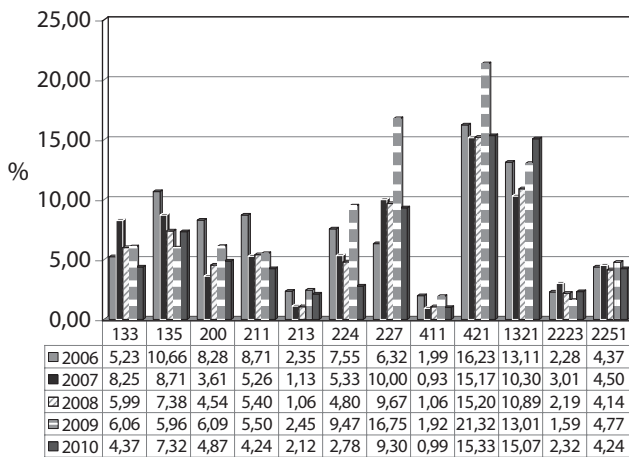


Rys. 6. Pęknięcia szyn w poszczególnych miesiącach na tle średnich temperatur, w których wystąpiły

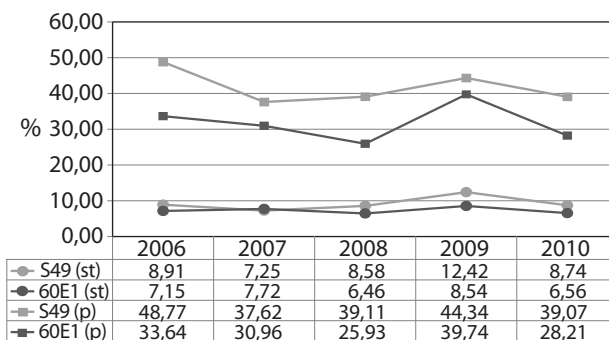
Rysunek ten jest jeszcze jednym potwierdzeniem wieloletnich obserwacji wykazujących duży wpływ temperatur na pękanie szyn, chociaż należy wyraźnie stwierdzić, że temperatura nie może być traktowana jako przyczyna pęknięcia szyny, a jedynie jako warunek sprzyjający.

4. PĘKNIĘCIA SZYN W SPOINACH TERMITOWYCH

Pęknięcia szyn w spoinach termitowych (wada 421) zajmują najwyższą pozycję wśród wszystkich innych pęknięć szyn (rys. 7), przy czym, podobnie jak w całości pęknięć nieco częściej pękają spoiny w szynach S49 (49E1) niż w szynach UIC 60 (60E1), rysunek 8, [3, 4].



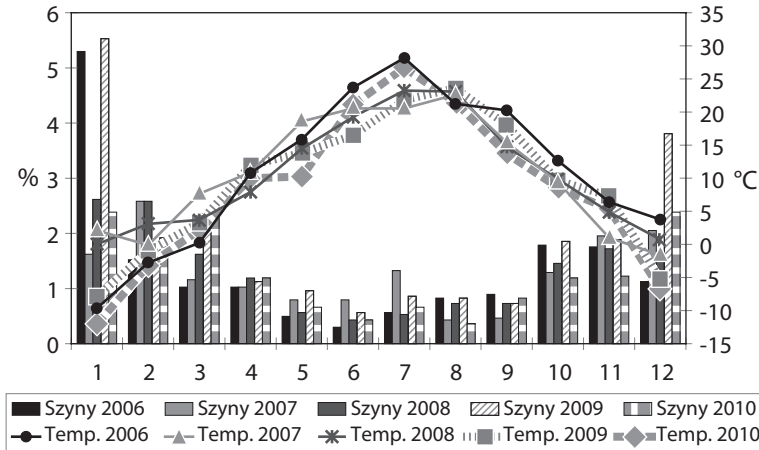
Rys. 7. Najczęściej występujące rodzaje pęknięć szyn według katalogu [15] w kolejnych latach⁵



Rys. 8. Pęknięcia szyn w spoinach na tle wszystkich pęknięć

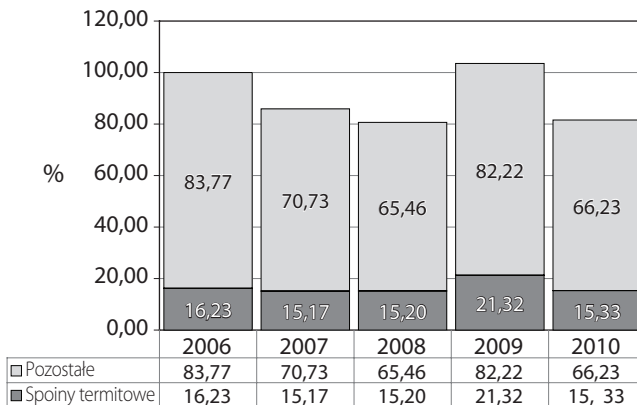
⁵ Katalog wad w szynach. Karta UIC 712R, 2002.

Rozkład pęknięć szyn w spoinach termitowych w zależności od temperatury jest podobny do rozkładu wszystkich pęknięć (rys. 9). W nielicznych tylko przypadkach w kwartałach II i III przekraczają one 1% wszystkich pęknięć, jakie wystąpiły w 2006 roku.



Rys. 9. Rozkład pęknięć szyn w spoinach termitowych na tle zanotowanych średnich temperatur

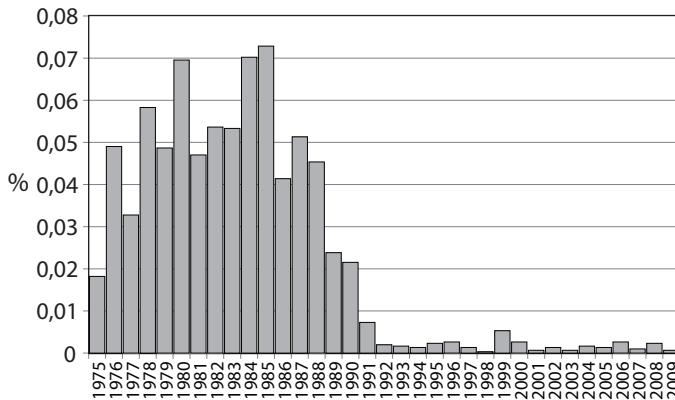
W ujęciu relatywnym najwięcej pęknięć w spoinach wystąpiło w roku 2009, natomiast w latach 2007, 2008 i 2010, stosunek tych pęknięć do wszystkich pozostałych ulegał bardzo małym wahaniom i nieznacznie przekraczał 15% (rys. 10).



Rys. 10. Relatywny udział pęknięć szyn w spoinach termitowych

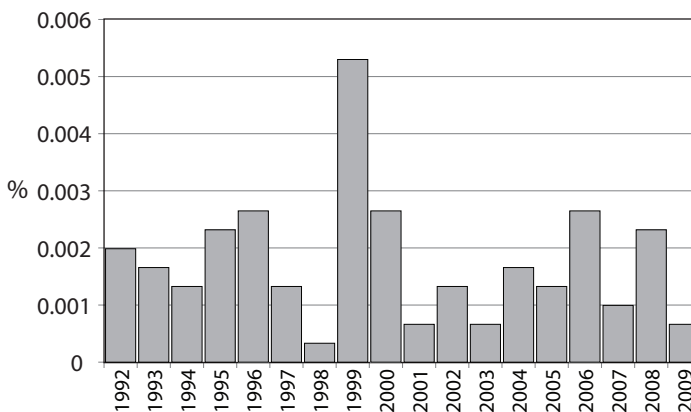
Informacją o istotnym znaczeniu, z której można wyciągnąć wnioski dotyczące dalszego przebiegu pęknięć szyn w spoinach termitowych jest przesłedzenie wieku pękających szyn. Przyjmując wszystkie pęknięcia szyn w roku 2006 jako 100%, wyznaczono odsetek pękniętych szyn w spoinach termitowych w całym pięcioletnim okresie, w za-

leżności od ich wieku (rys. 11). Najwięcej pęknięć w spoinach w rozpatrywanym pięcioleciu nastąpiło w szynach ułożonych w 1980, 1984 i 1985 roku, a więc w szynach mających średnio 26 lat. Dużo pęknięć szyn z lat 1975–1979 oznacza, że średni wiek tych szyn wynosił 31 lat.



Rys. 11. Wiek szyn z pęknięciami spoin termitowych, które wystąpiły w latach 2006–2010

Na podstawie rysunku 11 można jednak wyciągnąć dalej idący wniosek niż tylko dotyczący średniego wieku pękających szyn, bowiem w istocie rzeczy można na nim wyróżnić dwa rozkłady statystyczne – rozkład zbliżony do normalnego w latach 1975–1991 z dominantą w 1985 roku wynoszącą 0,072% i rozkład zbliżony do równomiernego w latach 1992–2009. Ten drugi rozkład jest wydzielony na rysunku 12. Jego dominanta równa 0,0052% jest prawie 14 razy mniejsza niż dominanta rozkładu zbliżonego do normalnego.

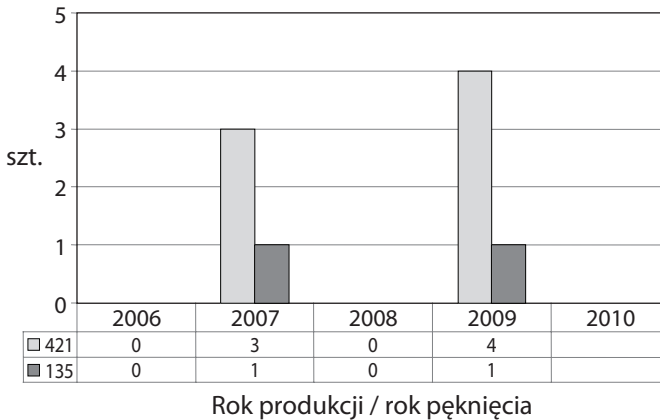


Rys. 12. Część histogramu przedstawionego na rysunku 11

Ta ostro zarysowana granica między dwoma okresami, tj. latami 1975–1991 i 1992–2009, wyklucza dopatrywania się przyczyny pęknięć szyn w spoinach jedynie w funkcji ich

wieku, co można by przyjąć (z dużym uproszczeniem) jako zależność w funkcji obciążenia. Gdyby tak istotnie było, to kształt wykresu przedstawionego na rysunku 8 nie miałyby tak zróżnicowanych postaci. Podstawową przyczyną tych różnic nie jest też zapewne zmniejszenie się wymian ciągłych szyn po 1992 roku. Czym zatem może być spowodowane to korzystne zmniejszenie się pęknięć szyn w spoinach termitowych wykonywanych od 1992 roku? Odpowiedzi, zdaniem autorów, należy szukać w poprawie technologii spawania termitowego. Wiadomo też od dawna, że pęknięcia spoin termitowych są powodowane głównie błędami technologicznymi [1].

Tę wysoce prawdopodobną hipotezę uzasadniają minimalne liczby pęknięć szyn w spoinach termitowych, jakie wystąpiły w rozpatrywanym okresie w tych samych latach, w których szyny te zostały ułożone (rys. 13).



Rys. 13. Liczby pęknięć szyn w spoinach termitowych (wada 421) i wychodzących z otworów na śruby łubkowe (wada 135) w latach ułożenia

Przypadki takie wystąpiły tylko w roku 2007 i 2009, natomiast w trzech pozostałych latach nie pękła żadna szyna w spoinie termitowej w roku jej ułożenia. To samo dotyczy też pęknięć typu 135.

Przytoczone liczby prowadzą do prognozy przyczynowo-skutkowej, którą można wyrazić krótko w postaci stwierdzenia, że w najbliższych latach, pęknięcia szyn w spoinach termitowych wyrażone w bezwzględnych wielkościach będą maleć. Prognoza ta w żadnej mierze nie powinna jednak osłabić starań o zmniejszenie zagrożeń, jakie na sieci kolejowej w Polsce stwarza ogólna liczba pęknięć szyn, wśród których pęknięcia w spoinach termitowych stanowią grupę dominującą.

Oprócz pęknięć w spoinach, duży udział mają również pęknięcia poprzeczne na przejściu główki w szyjkę (1321) i pęknięcia miejscowe, zagłębione pod powierzchnią toczną (*squat*), mające numer 227. Te ostatnie wykazały dużą dynamikę wzrostu – z niespełna 10% w 2008 roku do prawie 17% w 2009 roku. W porównaniu z pęknięciami na spoinach termitowych, niewiele jest pęknięć poprzecznych na zgrzeinach (411). Na tle

dużej liczby pęknięć szyn w spoinach termitowych interesująca jest informacja [13], że na kolejach japońskich, na których w ostatnich latach wykonuje się ponad 25 000 spoin termitowych rocznie, liczba ich pęknięć nie przekracza 10.

5. MOŻLIWE BŁĘDY W PROGNOZOWANIU PĘKNIĘĆ SZYN I ICH WSKAŹNIKI

Prognozowanie rozwoju pęknięć szyn na podstawie wykresów i wielomianów przedstawionych na rysunkach 1 i 2 doprowadziłoby do grubych błędów i tak na podstawie historii pęknięć w latach 2006–2008 można by dojść do wniosku, że w 2009 roku pęknięcia zmniejszą się, natomiast biorąc pod uwagę ich rzeczywisty duży wzrost w 2009 roku można by stwierdzić, że trend wzrostu utrzyma się. Błąd takich prognoz wynika z niewystarczającej długości szeregu czasowego, na podstawie którego prowadzono by ekstrapolację. Praktyka bowiem wykazuje, że ekstrapolacja nie powinna wykraczać poza 20% przedział przebadanego okresu. Również budowanie prognoz na następne lata na podstawie wielomianów trzeciego stopnia pokazanych na tych rysunkach, przyniosłoby prawdopodobnie błędne wyniki.

Znacznie większą dokładność prognozowania można osiągnąć rozpatrując okresy kwartalne lub półroczne i tak, np. na podstawie tych samych statystyk autorzy referatu przeprowadzili prognozę pęknięć w lecie 2010 roku [3]. Znana już była w owym czasie liczba pęknięć szyn w I półroczu 2010 roku, wynosząca $y'_{10} = 46,49\%$ wszystkich pęknięć w roku 2006. W poprzednich latach pęknięcia szyn w I półroczu stanowiły następujący odsetek wszystkich pęknięć w danym roku:

$$2006 \quad p_6 = 65,76,$$

$$2007 \quad p_7 = 52,97,$$

$$2008 \quad p_8 = 52,30,$$

$$2009 \quad p_9 = 52,32.$$

Przyjmując, że stosunek pęknięć szyn w pierwszym półroczu 2010 roku do całości pęknięć będzie równy średniej z czterech ostatnich lat, oszacowano procent y_{10} pęknięć w całym roku 2010 według wzoru

$$y_{10} = \frac{y'_{10}}{\frac{\sum_{i=6}^9 p_i}{4}} \cdot 100 \% \quad (1)$$

Podstawiając odpowiednie wartości, otrzymano

$$y_{10} = \frac{46,49 \cdot 100}{\frac{65,76 + 52,97 + 52,30 + 52,32}{4}} = 83,26\%.$$

Jak wynika z rysunku 2, tych pęknięć było łącznie 81,56%. Błąd prognozy wyniósł więc tylko 1,7%.

Wyznaczanie dokładniejszych trendów w znaczeniu matematycznym wymaga jednak nagromadzenia danych z wielu lat. Powstaje więc pytanie, czy statystyki pęknięć szyn będą miały pełną wartość dopiero po kilkunastu latach? Stojąc na gruncie scharakteryzowanych metod prognoz jakościowych i uwzględniając znaczenie gospodarcze prognozowania, na pytanie to należy odpowiedzieć negatywnie, dysponując bowiem liczbami pęknięć szyn z okresu nawet 3–4 lat można przez analogię oszacować zakres niezbędnych wymian rocznych i niebezpieczeństwo wykolejeń spowodowanych pęknięciami szyn.

Rozpatrując potrzeby wymian w skali całej sieci, należy najpierw pogrupować wszystkie tory. Załóżmy w celu uproszczenia, że na pewnej, bliżej niekreślonej sieci kolejowej, tory podzielono tylko na dwie grupy, przy czym długość torów głównych wynosi l_g [km], a rocznie pęka na nich n_g [szt.] szyn, co daje wskaźnik pęknięć na 1 km rocznie określony wzorem:

$$p_g = \frac{n_g}{l_g} [1/\text{km}/\text{rok}]. \quad (2)$$

Wskaźnik tolerowanego pęknięcia szyn w tej grupie ze względu na nieprzekroczenie zjawiska pęknięć lawinowych przyjmuje się jako k_g [1/km]. Przy założeniu, że odsetek pęknięć nie będzie się zmieniał, konieczna długość wymian szyn w tej grupie wynosi

$$w_g = \frac{l_g p_g}{k_g} [\text{km}/\text{rok}]. \quad (3)$$

Podstawiając za p_g wyrażenie (2) otrzymujemy

$$w_g = \frac{n_g}{k_g}. \quad (4)$$

Przyjmijmy, że w torach głównych, przyjętej w przykładzie sieci kolejowej pęka 2450 szyn rocznie. Wskaźnik akceptowalnego ryzyka przyjęto w tej grupie torów $k_g = 5$ [1/km]. Konieczna długość wymian szyn w tej grupie torów wynosi więc

$$w_g = \frac{2450}{5} = 490 \text{ km}/\text{rok}.$$

W torach bocznych tej sieci pękło $n_b = 900$ szyn, przy wskaźniku akceptowalnego ryzyka $k_b = 7$ [1/km], co wymaga wymian szyn $900/7 = 129$ km/rok. Łącznie roczna planowana wymiana szyn na tej przyjętej dla przykładu sieci wynosi 619 km. Liczba ta nie obejmuje wymian wynikających z niedoborów z lat poprzednich oraz koniecznych wymian szyn w łukach o małych promieniach, ustalanych na podstawie pomiarów zużycia bocznego, a nie liczby wymian pojedynczych.

Na podobnej zasadzie można szacować czas wymian szyn na poszczególnych liniach kolejowych, pamiętając jednak, że obliczone wartości będą się na nich zmieniały zależnie od zmieniającego się trendu narastania wymian pojedynczych. Większe prawdopodobieństwo trafności prognozy stwarza więc w tym przypadku posługiwanie się znanym i powszechnie stosowanym systemem SOKON.

Gdyby długość torów głównych wynosiła $l_g = 22\ 000$ km, wówczas roczny wskaźnik pęknięć na 1 km toru byłby równy

$$p_g = \frac{2450}{22000} = 0,1111/\text{km/rok}.$$

Na niektórych kolejach przyjmuje się wskaźniki pęknięć szyn [1/km/rok], uzależniając je od prędkości pociągów. I tak w Anglii przyjęto [25]:

- $6,22 \cdot 10^{-4}$ – na liniach dużej prędkości,
- $6,22 \cdot 10^{-3}$ – na liniach o średnich prędkościach,
- $1,86 \cdot 10^{-2}$ – na liniach o małych prędkościach.

Na podstawie danych zawartych w raporcie Centrum Transportowego USA w Pueblo, opracowanego dla Urzędu Transportu Kolejowego w Wielkiej Brytanii [22] można sądzić, że założenia te odbiegają od stanu, który charakteryzował drugą połowę lat ostatniej dekady ubiegłego wieku (tabl. 1).

Tablica 1

Pęknięcia i uszkodzenia szyn w ciągu roku i wskaźniki p_g

Kraj	Liczba pęknięć i uszkodzeń	Wskaźnik p_g [1/rok/km]
Francja	510	$9,84 \cdot 10^{-3}$
Niemcy	1105	$1,18 \cdot 10^{-2}$
Wielka Brytania	918	$2,98 \cdot 10^{-2}$

Jak już wspomniano we wstępie, od tego czasu pęknięcia szyn na kolejach angielskich systematycznie zmniejszały się i w 2008 roku wynosiły tylko 170, nie licząc metra londyńskiego, gdzie pękły 32 szyny [16]. W Wielkiej Brytanii przyjęto, że wskaźnik wy-kolejń lub zderzeń pociągów nie powinien przekraczać 0,168 na 1 mld pociągo-kilometrów [19]⁶.

Na kolejach USA na pierwszorzędnym liniach do przewozów towarowych rzeczywisty wskaźnik pęknięć szyn wynosi $6,22 \cdot 10^{-2}$ 1/rok/km. Opierając się na własnych i europejskich doświadczeniach, przyjęto w USA następujące wartości wskaźników p_g :

- $5,56 \div 6,62 \cdot 10^{-2}$ – na ogólnych liniach towarowych,
- $4,44 \div 4,97 \cdot 10^{-2}$ – na głównych liniach towarowych,

⁶ Według [16] w roku 2007 na 1 mld pociągo-kilometrów, w tym kraju liczba wypadków śmiertelnych wśród pasażerów wyniosła 0,3, przy wskaźniku 0,8 w 27 krajach UE.

- $2,49 \div 3,72 \cdot 10^{-2}$ – na liniach towarowych z ograniczonym ruchem pasażerskim,
- $6,22 \cdot 10^{-3} \div 1,86 \cdot 10^{-2}$ – na liniach z ruchem pasażerskim o prędkościach do 150 km/h,
- $3,11 \cdot 10^{-3} \div 6,22 \cdot 10^{-3}$ – na liniach o prędkościach 150–200 km/h,
- $6,22 \cdot 10^{-4}$ – na liniach dużej prędkości (200 km/h i więcej).

Można więc przyjąć, że na liniach z ruchem pasażerskim o prędkościach do 150 km/h, akceptuje się w Europie i USA od $6,22 \cdot 10^{-3}$ do $1,86 \cdot 10^{-2}$ pęknięć na 1 km w ciągu roku [24]. Zakładając, że czas eksploatacji szyn wynosi 40 lat, otrzymalibyśmy wartość k_g równą odpowiednio 0,25 i 0,74 [1/km], a zatem wartość o jeden rząd mniejszą niż wskaźniki przyjmowane w przykładach.

Porównanie wskaźników k_g przyjmowanych w Polsce z przytoczonymi w artykule [25] będzie pełniejsze, gdy odniesiemy je do linii kolejowej o długości 300 km, przy założeniu, że szyny będą pracowały 40 lat. Przyjęcie $k_g = 5$ oznacza, że w okresie między naprawami głównymi może pęknąć $300 \cdot 5 = 1500$ szyn, przy czym czas nie jest tu określony. Według kryterium średniej z przedziału $3,73 \cdot 10^{-3} \div 1,86 \cdot 10^{-2}$, tj. $1,52 \cdot 10^{-2}$, liczba pęknięć na takiej linii nie powinna być większa niż $1,52 \cdot 10^{-2} \cdot 40 = 182$, a więc ponad 8 razy mniejsza niż przyjmowana w Polsce.

Różnica ta wynika z różnego podejścia do określania granic użyteczności szyn. Ustalając wartości wskaźników k_g zakłada się, że nie powinno dojść do lawinowego wzrostu pęknięć szyn. Doświadczenie uczy, że przy tych wartościach zjawiska lawinowych pęknięć nie występują [21]. U podstaw rozważań amerykańskich tkwi natomiast założenie o nieprzekroczeniu zakładanego ryzyka wykolejeń. Przy statystykach USA, wykazujących, że jedno wykolejenie przypada na 120 pęknięć na rozpatrywanej linii w ciągu jej 40 letniej eksploatacji, prawdopodobieństwo dwóch wykolejeń spowodowanych pęknięciami szyn wyniosłoby $182/120/2 \approx 0,76$. Biorąc jednak pod uwagę rzeczywisty wskaźnik pęknięć szyn w USA, tj. $6,22 \cdot 10^{-2}$, tych pęknięć byłoby 744, a więc tylko o połowę mniej niż wynika ze wskaźników przyjmowanych w Polsce. Na linii o długości 300 km, eksploatowanej 40 lat oznaczałoby to prawdopodobieństwo wystąpienia $744/120 \approx 6$ wykolejeń w tym okresie.

Opracowywane systemy bezpieczeństwa w PLK S.A. powinny określać poziom akceptowalnego ryzyka wykolejeń, m.in. z powodu pęknięć szyn. Nie można bowiem zakładać, że nawet przy najlepszej kontroli defektoskopowej i wprowadzeniu nowego systemu monitorowania szyn, np. proponowanego po zaistnieniu katastrofy na szlaku Wronki – Miały [2], uda się całkowicie takie wykolejenia wyeliminować. Warto przy okazji nadmienić, że opracowanie innych wskaźników bezpieczeństwa, związanych z eksploatacją nawierzchni kolejowej i określenie ich wartości liczbowych powinno stanowić immanentną część tworzonych obecnie systemów zarządzania bezpieczeństwem. Systemy te powinny zawierać nie tylko zalecenia ogólne, lecz również wiele szczegółów mających znaczenie edukacyjne, jak na przykład listy kontrolne. Warto również rozważyć wzbogacenie tych systemów o załączniki zawierające studia przypadków.

Bezwzględne liczbowe statystyki pęknięć szyn i ich liczba przypadająca na jedno wykolejenie – jak już wspomniano – nie są w Polsce publikowane. Wskaźnik p_g można

jednak wyznaczyć ze wzoru (5), zakładając liniowe narastanie pęknięć szyn w czasie ich eksploatacji t_e :

$$p_g = \frac{k_g}{t_e}. \quad (5)$$

Przyjmując $k_g = 6$ [1/km] i $t_e = 50$ lat, otrzymuje się $p_g = 0,12$ [1/km/rok]. Zakładając nawet kilkakrotnie większą niż w USA liczbę pęknięć przypadających w Polsce na jedno wykolejenie, a więc mniejszy poziom zagrożenia, można dojść do wniosku, że przy przyjmowanych dotychczas w kraju kryteriach ciągłych wymian szyn, tj. najczęściej $k_g = 6$ [1/km], relatywna liczba wykolejeń spowodowanych pęknięciami szyn może być większa niż wynikająca ze wskaźników innych kolei (jeśli są one dotrzymywane).

Zmniejszenie wartości wskaźników k_g oznaczałoby konieczność planowania większej rocznej długości ciągłych wymian nawierzchni niż te, które powinny być wykonywane na podstawie dotychczasowych zasad (w stosunku, do których wymiany rzeczywiste są dużo mniejsze).

5. WNIOSKI

W świetle przedstawionych różnic między możliwościami wymian szyn, ograniczonych dostępnymi zasobami i przyjmowanym na innych kolejach akceptowalnym ryzykiem pęknięć, nasuwa się konieczność podjęcia pewnych działań profilaktycznych, które powinny wpłynąć na zmniejszenie zjawiska pęknięcia szyn. Możliwości takich jest wiele. Autorzy chcieliby zwrócić uwagę na 5 zagadnień, nie wymagających dużych nakładów i stosunkowo łatwych do wprowadzenia, które mogą zmniejszyć zagrożenia wynikające z pęknięć szyn lub ułatwić monitorowanie tego procesu.

1. Poza systematycznie prowadzoną kontrolą defektoskopową, wskazane jest m.in. wzbogacenie diagnostyki wizualnej uszkodzeń kontaktowo-zmęczeniowych na powierzchni tocznej szyn. Do wstępnej oceny nadają się do tego celu szybkie kamery zainstalowane na dreźnie pomiarowej. Na podstawie preselekcji wyników uzyskiwanych tą drogą, łatwiejsze i mniej pracochłonne staną się kontrole na miejscu w torze. Za tą koniecznością przemawia znaczny odsetek pęknięć typu 227 (*squat*) oraz – mimo stosunkowo mniej częstych pęknięć szyn przypisywanych rysom (wada 2223) – niepokojące doświadczenia różnych kolei o skutkach, jakie ona niesie [6]. Rozwój rys na zaokrągleniu główki przybrał na pewnych liniach kolejowych (np. w Anglii) charakter groźny szczególnie w łukach, na których prędkość pociągów wynosi 160÷200 km/h. Nie brak jednak również na prostych odcinkach toru oraz w rozjazdach i skrzyżowaniach. Wada ta stwarza też coraz większe problemy w Niemczech, gdzie w 1999 roku stała się przyczyną około 30% spośród 1400 pęknięć szyn. Przy rozpoznawaniu obrazów rejestrowanych przez kamery jest możliwe zastosowanie sztucznych sieci neuronowych.

2. Nie lekceważąc tych informacji oraz pewnych obserwacji krajowych, warto podjąć prace nad kryteriami oceny rys i koniecznością wymian szyn z tego powodu. Licząc się ze wzrostem tego niebezpieczeństwa w Polsce, wskazane byłyby m.in. badania wytrzymałościowe szyn o różnym rozmiarze rys. Wzrost tych uszkodzeń na wielu kolejach wpłynął na rozwój nowoczesnych technik ich badań. Efekt synergii uzyskano z połączenia techniki defektoskopowej z techniką prądów wirowych [25]. W pociągu eksploatowanym przez koleje niemieckie [12] zastosowano 10 głowic ultradźwiękowych i 4 głowice prądów wirowych. Prędkość pomiarowa wynosi od 40 do 80 km/h. Rejestracja sygnałów jest dowiązana do kilometrażu i do współrzędnych GPS. Sygnały z 1 km zajmują około 250 Mb pamięci, co wyklucza możliwość analizowania surowych wyników przez człowieka. Do preselekcji tych wyników zastosowano więc sztuczną sieć neuronową. Po każdym 1000 m sygnały są przetwarzane w czasie realnym, a sieć dzieli je na 4 grupy – pierwszą OK i trzy typy uszkodzeń. Wskutek konieczności bardzo dokładnego prowadzenia głowic badających szyny prądami wirowymi, opanowanie tej techniki nie jest łatwe [14]. Z tego powodu w najbliższych latach duży nacisk należy położyć na zastosowanie diagnostyki wizualnej, opartej na sprawdzonych kryteriach.
3. Ze statystyk wynika, że na jednym odcinku linii w tym samym dniu występuje niejednokrotnie kilka pęknięć szyn. Z dużym prawdopodobieństwem można twierdzić, że przypadki takie są spowodowane oddziaływaniem wagonów z płaskimi miejscami na kołach. W celu zmniejszenia tego zjawiska, konieczne są działania zmierzające do bardziej skutecznego eliminowania z eksploatacji wagonów z płaskimi miejscami i nalepami na kołach. Oprócz konsekwentnego wykorzystania sygnałów z urządzeń detekcji taboru, tj. wyłączania takich wagonów ze składu pociągów, warto w tym celu zastosować eksplorację danych zawartych w bazie pęknięć szyn (*data mining*)⁷. W konkretnym przypadku można identyfikować serie pęknięć szyn na każdym odcinku linii, zaistniałych w poszczególnych dniach roku i na podstawie dzielących je odległości, wieku szyn, temperatury i ewentualnie innych czynników, wyprowadzać konkluzje dotyczące związku przyczynowo-skutkowego tych pęknięć z płaskimi miejscami na kołach. Wprowadzenie takiego systemu mogłoby w pewnych sytuacjach (np. przy kursowaniu na danym odcinku linii wagonów tylko jednego przewoźnika) ułatwić dochodzenie roszczeń za spowodowane straty lub przynajmniej wywierać presję na lepsze utrzymywanie wagonów. Informacje takie miałyby również pewne znaczenie przy ustalaniu lokalizacji nowych urządzeń detekcji taboru i ocenie skuteczności dotychczasowego systemu (skuteczność ta zależy nie tylko od urządzeń, lecz również od konsekwencji w wykorzystywaniu ich sygnałów).
4. Przy analizie rozkładu wad (rys. 7) nasuwają się pewne wątpliwości, czy ich kwalifikacja jest zawsze poprawna. Wątpliwości takie istniały od dawna, a przed kilkudziesięciu laty stwierdzono na przykład, że pęknięcia zmęczeniowe w głowce były często za-

⁷ *Data mining* oznacza wydobywanie wiedzy z baz danych na podstawie zawartych w nich informacji, z wykorzystaniem szybkości komputera, ukrytych dla człowieka (ze względu na możliwości czasowe).

liczane do wady 200, tj. do pęknięć bez widocznej przyczyny. To samo dotyczyło występującej w owym czasie wady 253, tj. pęknięć pochodzących od niezgranych pęcherzy gazowych w stopce szyny, które zostały całkowicie wyeliminowane wraz z nową technologią walcowania szyn. Zwiększenie prawdopodobieństwa poprawnej kwalifikacji pęknięć szyn nastąpiłoby, gdyby składnikiem karty złamania szyny/złącza stało się zdjęcie lub kilka zdjęć, ukazujących to uszkodzenie. Wprowadzenie tej zasady jest stosunkowo proste i przy spadających cenach aparatów fotograficznych mało kosztowne. Rozpowszechnienie w jednostkach PLK S.A. fotografii dokumentacyjnej z właściwym opisem fotografowanego stanu, przyniosłoby też dodatkowe korzyści, np. w postaci większej obiektywności ocen stanu toru wymagającego ograniczeń prędkości pociągów. Wprowadzenie fotografii do dokumentowania pęknięć szyn powinno być poprzedzone rozpowszechnieniem odpowiedniego materiału o charakterze instruktażowym. Przy okazji warto wspomnieć, że wykonywanie zdjęć dokumentujących katastrofy lotnicze odbywa się – podobnie jak całość badań wykonywanych po tych katastrofach – według ściśle określonych i bardzo obszernych zasad zawartych w monografii [17].

5. Analiza pęknięć szyn, a zatem zwiększenie użyteczności wniosków wyciąganych na tej podstawie, byłaby pełniejsza, gdyby w bazie danych pęknięć szyn znalazły się informacje, których obecnie nie ma, a więc informacje o skutkach pęknięć (np. bez następstw, ograniczenie prędkości po prowizorycznym zabezpieczeniu szyn i czas jego trwania, wykoślenie i jego skutki itp.). Jednocześnie można by zrezygnować z pewnych informacji wymaganych obecnie w kartach złamania szyn, jak np. cechy wklęsłe szyn leżących w torze ponad 10 lat, które są trudne do odczytania.

BIBLIOGRAFIA

1. Acquati M. et al.: *Trackwork Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS) study for metro project*. 10th International Conference of Rail Engineering, London 2009
2. Bałuch H. *Koncepcja systemu monitorowania szyn*. „Praca CNTK nr 8064/61”, Warszawa, 2004.
3. Bałuch H., Bałuch J.: *Pękanie szyn w spoinach termitowych w świetle statystyk*. Zeszyty Naukowo-Techniczne SITK RP Oddział w Krakowie, nr 154, 2010
4. Bałuch H., Bałuch J.: *Pękanie szyn w spoinach termitowych w świetle statystyk*. II Konferencja Spawalnicza, Pszczyna, 2–4.02.2011.
5. Bouillaut L. et al.: *Dynamic Bayesian network modeling maintenance strategies: prevention on broken rails*. www.inrets.fr/ur/ltn/poles/diag/pdf/WCRR'08.pdf.
6. Care R.F., Clark S.L., Dembosky M.A.: *Developing rolling contact defense plans for infrastructure*. 4th International Conference RAIL ENGINEERING, London, 2003.
7. Cieślak M. (red.): *Prognozowanie gospodarcze – metody i zastosowania*. Warszawa, PWN, 1997.

8. Dick C.T. et al.: *Predicting the occurrence of broken rails: a quantitative approach*. www.arena.org/e-series/scriptcontent/custom/e_arena/.../00045.pdf.
9. Dick C.T. et al.: *Multivariate statistical model for predicting occurrence and location of broken rails*. University of Illinois. „Transportation Research Work”, 2003, No. 1825.
10. Garcia G. et al.: *Advantages of an ultrasonic rail joint bar inspection approach*. „Railway Track and Structures”, 2010, No. 6.
11. Hansen J., Culvert J.: *Eddy current testing, a solution to detecting rolling contact fatigue in rail?* 3rd International Conference RAIL ENGINEERING, London, 2002.
12. Heckel T., Thomas H.M., Rühle S.: *New developments for non-destructive rail testing*, 10th International Conference RAIL ENGINEERING, London, 2009.
13. Ito H. et al.: *Occurrence condition and preventive methods for solidification cracks in alumino-thermic welds*. „Quarterly Report of RTRI”, 2010, No. 2.
14. Jungen M. et al.: *Eddy current technology for rail inspection: Potential and implementation*. 5th International Conference RAIL ENGINEERING, London 2004.
15. *Katalog wad w szynach*. Karta UIC 712R, 2002.
16. Keep M.: *Rail safety statistics*. House of Common Library. Standard note SN/SG/2043, 31 March, 2010.
17. Krystek R. (red.): *Zintegrowany system bezpieczeństwa transportu*. Tom I. Warszawa, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, 2009.
18. Marx A. et al.: *Visualising infrastructure condition*. „International Railway Journal”, 2010, No. 8.
19. Min A. et al.: *Safety assessment in railway – the current status and future aspects*. 3rd International Conference RAIL ENGINEERING, London, 2002.
20. Nowak E. (red.): *Prognozowanie gospodarcze – metody, modele zastosowania, przykłady*. Warszawa, Agencja Wydawnicza PLACET, 1998.
21. Radomski R.: *Trwałość eksploatacyjna szyn na wybranych odcinkach toru nr 1 i 2 linii Katowice-Tczew*. „Technika Transportu Szynowego”, 2009, nr 7/8.
22. Sawley K., Reiff R.: *Rail failure assessment for the office of the rail regulation*. „Transportation Technology Center”, Pueblo, October 2000.
23. Yianni S.: *Innovation is important for Network Rail*. „European Railway Review” 2010, issue 6.
24. Zaremski A.M., Palese J.W.: *Risk based ultrasonic rail test scheduling. Practical applications in Europe and North America*. Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems, Gothenburg, Sweden, June 2003.
25. Zaremski A.M.: *Guidelines for Broken-rail Risk*. „Railway Track and Structures”, 2009, No 10.