

## WYBRANE ZAGADNIENIA TRWAŁOŚCI I NIEZAWODNOŚCI SZYN KOLEJOWYCH

**Henryk BAŁUCH\***

**STRESZCZENIE:** *Referat przedstawia możliwości zwiększenia trwałości szyn oraz zmniejszenia ryzyka związanego z ich pękaniem. Zwiększenie trwałości można uzyskać dzięki szlifowaniu. Zbudowanie sztucznej sieci neuronowej pozwoli oszacować prawdopodobieństwo pęknięcia w okresie do kolejnej kontroli defektoskopowej. Do tego celu trzeba jednak dysponować setkami przykładów. Ich zebranie jest możliwe.*

### **CHOSEN QUESTIONS OF DURABILITY AND RELIABILITY OF RAILROAD RAILS**

*The increasing of the rail replacement period is possible through their grinding. A method for estimating limits of the rail head defects can be develop using artificial neural network.*

### **1. WSTĘP**

O niezawodności nawierzchni kolejowej decydują jej wszystkie części składowe. Niezawodność szyn ma jednak w tym układzie znaczenie najważniejsze z dwóch powodów:

- 1) ich przejście ze stanu pełnej zdatności eksploatacyjnej do stanu niezdatności objawia się często w sposób nagły, stwarzając ryzyko wykołajeń,
- 2) stanowią one najdroższy składnik konstrukcji nawierzchni.

Niezawodność nawierzchni będzie skupiać na sobie w najbliższych latach coraz większą uwagę ze względu na zwiększającą się degradację dróg kolejowych w Polsce oraz rosnące ryzyko wypadków, a także wskutek otwarcia rynku przewozów towarowych, co sprawi, że wszelkie zakłócenia ciągłości ruchu kolejowego i bezpieczeństwa na liniach kolejowych przestaną być wyłącznie sprawą wewnętrzną.

---

\* Prof. dr hab. inż. Henryk BAŁUCH., Centrum Naukowo-Techniczne Kolejnictwa

Pęknięcia i złamania szyn stały się w ostatnich latach przyczyną kilku głośnych wypadków [5,7,18,21,22]. Konieczność utrzymania akceptowalnego poziomu ryzyka eksploatacji dróg kolejowych stawia w scharakteryzowanych warunkach przed Polskimi Liniami Kolejowymi i wspomagającymi je jednostkami badawczymi dwa podstawowe i z pozoru sprzeczne zadania:

- a) zwiększenia trwałości szyn już eksploatowanych,
- b) zmniejszenia liczby pęknięć i złamań.

Sposobem prowadzącym do osiągnięcia tych celów jest m.in. wprowadzenie systemu monitorowania szyn przedstawionego szerzej w artykule [5]. System ten powinien:

- 1) zmniejszyć ryzyko pęknięć szyn, mimo wzrastającej ciągle degradacji dróg kolejowych w Polsce,
- 2) umożliwić racjonalne użytkowanie szyn, w których stwierdzono pewne wady, poprzez ułatwienie podejmowania decyzji o terminach ich wymiany podejmowanych dotychczas w większości intuicyjnie.

Niniejszy referat, nawiązujący do artykułu [5] przedstawia pewne sposoby ułatwiające rozwiązanie zadań a) i b).

Śledzeniu narastania pojedynczych wymian szyn z próbą prognozowania tego zjawiska poświęcono już w Polsce wiele prac [2, 3,19,20]. Zagadnienia związane z trwałością szyn, zwłaszcza zaś z ich pęknięciami w funkcji różnych wielkości, znajdują również odzwierciedlenie w pracach wielu autorów zagranicznych np. [8,13,15,21].

## 2. TRWAŁOŚĆ SZYN I MOŻLIWOŚĆ JEJ ZWIĘKSZENIA

Trwałość szyn determinują następujące czynniki:

- zużycie (ubytek przekroju w wyniku starcia i zgniecenia),
- uszkodzenia wewnętrzne doprowadzające do pęknięć,
- uszkodzenia kontaktowo-zmęczeniowe rozwijające się w główce szyny,
- zużycie faliste.

W przeciwieństwie do dawniej stosowanych, lekkich typów szyn, które wymieniano po osiągnięciu przez nie zużycia (starcia) przyjmowanego jako graniczne ze względu na wymagany najmniejszy moment bezwładności, w szynach obecnie eksploatowanych zużycie pionowe nie stanowi już granicy używalności, głównie ze względu na duże zapasy wytrzymałości.

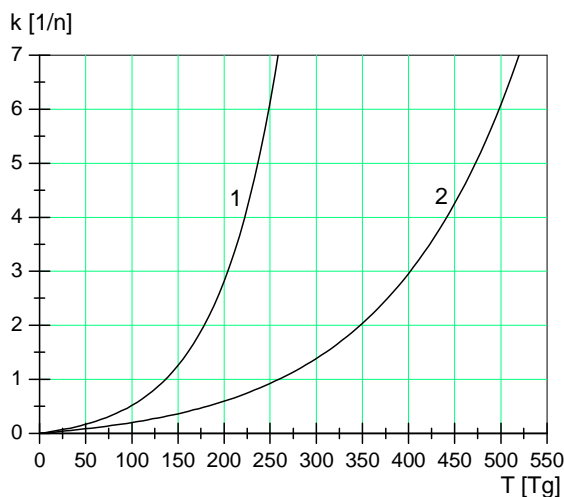
O zapasach tych świadczą wyniki badań naprężeń w rozjazdach typu 60E1 (UIC 60) ułożonych na podrojazdnicach betonowych [1]. W przedziale prędkości 160 ÷ 200 km/h przy nacisku osi lokomotywy 210 kN naprężenia te w większości przypadków nie przekraczały 60 MPa (przy granicy plastyczności stali szynowej nie mniejszej niż 500 MPa i granicy wytrzymałości zmęczeniowej 320 MPa). W jednym tylko przypadku naprężenie w iglicy osiągnęło przy prędkości 187 km/h wartość 130 MPa.

Intensywność zużycia pionowego obecnie eksploatowanych szyn jest mała i w chwili ich wymian po przeniesieniu obciążenia rzędu 500 Tg wynosi zwykle kilka milimetrów. Obserwacje podobne są odnotowywane również na innych kolejach, np. w Niemczech przyjmuje się zużycie 1 mm/100 Tg [13]. Pomijając zużycie boczne, warto odnotować tendencję zmniejszającej się liczby pęknięć szyn spowodowanych wadami struktury materiału, co jest wynikiem doskonalenia produkcji stali szynowej. Zużycie faliste szyn, aczkolwiek negatywnie wpływające na stan utrzymania nawierzchni, zwłaszcza zaś przytwierdzeń i podsypki, wywołujące hałas oraz wibracje, również nie może być traktowane jako czynnik limitujący trwałość. Zapas przekroju obecnie stosowanych szyn jest bowiem tak duży, że umożliwia wielokrotne ich szlifowanie (pod warunkiem, że będzie ono wykonywane we właściwych cyklach rzędu 50 ÷ 100 Tg zależnie od intensywności rozwoju tego zjawiska i pojawiania się innych uszkodzeń).

Funkcje opisujące pojedyncze wymiany szyn oparte na obserwacjach eksploatacyjnych podano w monografii [6]. W ostatnich latach dało się zauważyć nieco większy przyrost pęknięć po przeniesieniu obciążenia 100 ÷ 300 Tg i złagodzenie ich przyrostu w dalszej fazie eksploatacji. W ten sposób nastąpiło pewne złagodzenie tzw. lawinowego pęknięcia szyn. Uwzględniając te spostrzeżenia w ramach projektu badawczego [24] opracowano nowe modele pojedynczych wymian szyn opisanych funkcjami (rys. 1):

$$\text{szyn 60E1 (UIC 60)} \quad k = 0,2 \left( \frac{T}{145} \right) - 0,2 \quad (1)$$

$$\text{szyn 49E1 (S49)} \quad k = 0,15 \left( \frac{T}{67} \right) - 0,15 \quad (2)$$



**Rys. 1.** Oszacowanie trwałości szyn 49E1 (1) i 60E1 (2) ze względu na pojedyncze wymiany

Funkcje te odpowiadają eksploatacyjnym warunkom uśrednionym. Jako średnią trwałość obu typów szyn przyjęto wartość obciążenia, przy którym liczba pojedynczych wymian szyn osiągnie  $k = 6 \cdot 1/\text{km}$ , tj. odpowiednio 500 i 250 Tg.

Uwzględniając realia eksploatacyjne dróg kolejowych w Polsce w pierwszej dekadzie 21. wieku scharakteryzowano warunki uśrednione następującymi wielkościami:

Prędkość 120 km/h,	Nacisk osi 200 kN,
Syntetyczny wskaźnik stanu toru 1,5 mm,	Tor na prostej.
Wskaźnik pociągów towarowych 0,3.	

Każde odchylenie od tych wartości wymaga wprowadzenia korekt trwałości szyn w postaci współczynników opracowanych w projekcie [24].

Ocena czasu eksploatacji szyn na kolejach zagranicznych nie jest jednolita. Najbardziej optymistyczne szacunki wskazują, że czas pracy szyn na nowych liniach kolejowych w Niemczech wyniesie  $35 \div 40$  lat [14], przy czym jednak wg innych źródeł wiek szyn na liniach intensywnie eksploatowanych wynosi w tym kraju 20 lat, a rozjazdów w torach głównych – 16 lat [16]. Według innych autorów czas eksploatacji szyn na głównych liniach kolei niemieckich wyniesie  $25 \div 30$  lat, co przy natężeniu przewozów 20 Tg/rok oznacza trwałość  $500 \div 600$  Tg [13].

We Francji i Holandii szyny są wymieniane co 25 lat (przy czym w Holandii są one przeznaczane na złom). Cykle wymian ciągłych szyn we Włoszech wg starszych źródeł wynosiły  $20 \div 25$  lat [16], obecnie zaś wynoszą średnio na liniach głównych 30 lat i na liniach bocznych 40 lat. Mając 22 600 km toru koleje włoskie wymieniają rocznie  $800 \div 1000$  km toru [23]. Trwałość szyn UIC 60A w metrze w Hong Kongu na odcinkach prostych jest szacowana na 540 Tg [15]. Bardzo duża jest oczekiwana trwałość szyn na kolejach kanadyjskich charakteryzujących się dużymi naciskami osi w ruchu towarowym. Według pracy [21] szyny o masie 57 kg/m przeniosą na tych kolejach obciążenie ponad 1000 Tg

Na trwałość szyn, podobnie jak i na trwałość pozostałych części nawierzchni kolejowej, wpływa duża liczba czynników konstrukcyjnych i eksploatacyjnych. W odniesieniu do większości tych czynników wpływu tego nie daje się jednak wyrazić liczbowo. Biorąc to pod uwagę w projekcie [24] przyjęto, że trwałość szyn powinna być określana jako wartość prawdopodobna.

Prawdopodobieństwo uzyskania trwałości rozpatrywanego elementu nawierzchni nie mniejszej niż  $T_p$  wyraża funkcja

$$\mu = P(T_\mu \geq T_p) \quad (3)$$

Do opisu funkcji  $\mu$  zastosowano zależności sigmoidalne o ogólnej postaci

$$\mu = \frac{1}{1 + \frac{\alpha^{(T_\mu - \beta T_m)}}{\delta}} \quad (4)$$

gdzie:

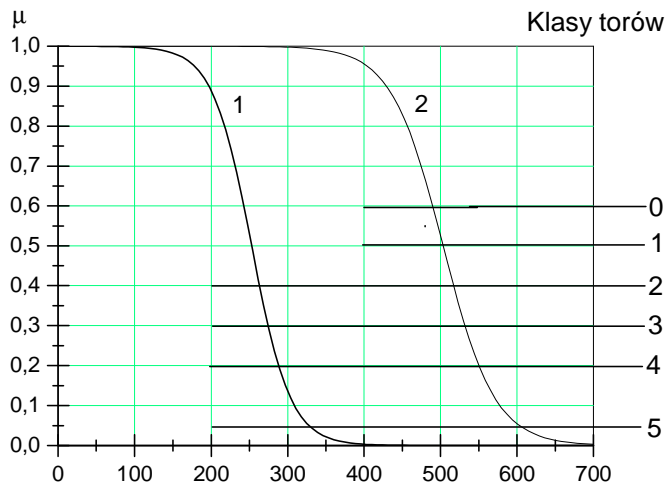
$\alpha, \beta, \delta$  - wartości stałe charakteryzujące dany typ szyny,  
 $T_m$  - trwałość średnia odpowiadająca prawdopodobieństwu 0,5.

Wyznaczone wg tego modelu prawdopodobieństwo uzyskania trwałości szyn nie mniejszej niż  $T$  [Tg] przedstawia rysunek 2.

Przekształcając wzór (4) dochodzi się do równania

$$T_\mu = \beta T_m + \frac{\log\left(\frac{\delta(1-\mu)}{\mu}\right)}{\log \alpha} \quad (5)$$

Trwałość nominalna szyn jest uzależniona również od klasy torów, w których znajdują one zastosowanie. Należy więc założyć, że czas eksploatacji szyn w torach niższych klas będzie dłuższy niż tych, które zostaną ułożone w torach klas wyższych, gdzie ryzyko następstw wynikających z uszkodzeń i pęknięć szyn musi być bardziej ograniczone. Zasadę tę można przedstawić przyjmując zróżnicowane prawdopodobieństwo trwałości szyn (rys. 2) i tak w torach najwyższej klasy, tj. klasy 0 przyjęto  $\mu = 0,6$  w torach zaś klasy 5  $\mu = 0,05$ . Czas pracy szyn w torach tej klasy odpowiadającej warunkom istniejącym na liniach znaczenia miejscowego, układanych zawsze jako stare użyteczne, nie wyznacza z reguły obciążenie lecz inne kryteria, jak np. korozja.



**Rys. 2.** Trwałość szyn: 1 – 49E1 (S49), 2 – 60E1 (UIC 60)

Przyjęte modele trwałości szyn nie uwzględniają pewnych szczególnych cech konstrukcyjno-eksploatacyjnych. I tak np. z praktyki wynika, że trwałość szyn na przejazdach kolejowych, wskutek zużycia korozyjnego kształtuje się zwykle w granicach 10 lat, nawet przy małym natężeniu przewozów. Przyspie-

szone procesy korozyjne występują też w tunelach wskutek prądów błędnych i wilgoci, zwłaszcza zaś w torach o dużym ruchu pociągów pasażerskich z wagonami nie mającymi zamkniętego systemu toalet. W tych i podobnych przypadkach jedyną wskazówką oszacowań trwałości są zebrane obserwacje osób zatrudnionych dłużej w miejscowych jednostkach eksploatacyjnych.

Trwałość szyn starych użytecznych przyjmuje się umownie jako równą połowie trwałości szyn nowych. Wartości charakteryzujące szyny wchodzące do wzoru (5) przedstawia tablica 1.

Przykładem posługiwania się prawdopodobieństwem w ocenie trwałości szyn, a zarazem eksploatacyjnych możliwości zwiększenia tej trwałości, może być praca [10]. Stwierdzono w niej, że z prawdopodobieństwem 99,9 % można uzyskać zwiększenie trwałości szyn o masie 60 kg/m w torach bezстыkowych, zakładanej na 600 Tg o 300 Tg dzięki ich regularnemu szlifowaniu na głębokość 0,1 mm po każdorazowym przejściu obciążenia 100 Tg. Wynik tych badań ma również duże znaczenie dla polskiego kolejnictwa, wskazuje bowiem na realną możliwość zwiększenia trwałości szyn typu 60E1 w naszym kraju do około  $600 \div 700$  Tg.

**Tablica 1.** Wartości przyjęte we wzorze (5) do opisu trwałości

Typ szyny	Trwałość średnia	Wartości przyjęte do obliczeń		
		$\alpha$	$\beta$	$\delta$
Szyna 60E1	500 Tg	1,03	0,96	2
Szyna 49E1	250 Tg	1,04	0,90	3

Warto wspomnieć, że na decydującą rolę szlifowania szyn w zapobieganiu rozwojowi ich uszkodzeń kontaktowo-zmęczeniowych, zwłaszcza w łukach o małych i średnich promieniach, wskazują wyniki nowszych badań angielskich. W łukach o promieniach średnich (rzędu 1500 m) i na odcinakach prostych istotne znaczenie w powstawaniu tych wad mają też nierówności poziome. W każdym przypadku dużą rolę odgrywają też cechy pojazdów szynowych, głównie ich sztywność i kształt profili kół [7].

### 3. ZMNIJSZENIE RYZYKA PĘKNIĘĆ SZYN

Z obecnej liczby złamań i pęknięć szyn w ciągu roku wynika, że na 1 km eksploatowanego toru przypada około 0,09 uszkodzeń. Przy upraszczającym założeniu, że pęknięcia szyn rozkładają się równomiernie we wszystkich torach wynika, iż wartość graniczna 6 sztuk na km została by przekroczona po około 65 latach eksploatacji. Z tego więc tylko powodu należałoby wymieniać rocznie 550 km toru. W rzeczywistości, uwzględniając większą częstotliwość pęknięć w torach szlakowych, wielkość tych wymian powinna być dużo większa. Wskaźniki te są niekorzystne. Istnieje więc pilna potrzeba podjęcia badań nad określeniem akceptowalnego poziomu ryzyka pozostawiania w eksploatacji szyn, w których wykryto pewne wady wewnętrzne.

Rozwój wad wewnętrznych nie jest jednakowy – w fazie początkowej rosną one wolniej, w stadium zaś końcowym – znacznie szybciej. Zmienne jest również prawdopodobieństwo ich wykrycia. Z badań amerykańskich [12] wynika, że największy wpływ na intensywność rozwoju wad ma temperatura, poziom naprężeń wewnętrznych, położenie szyn w łuku i ich typ. Zaskoczeniem jest stwierdzenie, że mały wpływ wywiera natomiast moduł sztywności i umiejscowienie wady. Przyjmuje się tam, że przeniesione obciążenie od chwili wykrycia wady do jej powiększenia grożącego złamaniem szyny wynosi 40 Tg. Częstotliwość kontroli szyn określa się wychodząc z założenia, że w przedziale czasu między tymi kontrolami na długości 1 mili (1,609 km) wskaźnik uszkodzeń może wynieść 0,1. Według tych samych badań prawdopodobieństwo wykrycia wad obejmujących określony procent powierzchni główki szyny wynosi:

Powierzchnia [%]	10	20	40	60	80
Prawdopodobieństwo [%]	25	60	90	99	100.

Przepisy kolei USA stanowią, że na torze z wadami szyn obejmującymi mniej niż 40 % powierzchni główki dopuszczalna prędkość wynosi 5 mil/h. Przy powierzchni większej lub niemożliwej do określenia, przy której przyjmuje się, że jest większa od 40%, tor zamyka się do czasu zabezpieczenia miejsca z wadą łubkami skręconymi na wszystkie śruby [9].

Liczbę pęknięć szyn można by zmniejszyć znając lepiej niż dotychczas zjawiska rozwoju wad. Pozwoliłoby to również na bardziej racjonalne planowanie kontroli defektoskopowych. Mając dużą liczbę przykładów pęknięć szyn z powodu rozwiniętych wad i opis warunków konstrukcyjno-eksploatacyjnych, w których znajdowała się dana szyna można by zbudować sztuczną sieć neuronową, która wskazywałaby prawdopodobieństwo pęknięcia innej szyny przed kolejną kontrolą defektoskopową. Wprowadzenie tego narzędzia do praktyki oznaczałoby zastąpienie stałych cykli kontroli defektoskopowych cyklami zmiennymi.

Zebranie dużej liczby przykładów pęknięć szyn z powodu wad w dzisiejszym stanie taniej fotografii cyfrowej nie wydaje się trudne. Wystarczyłoby więc dołączać do starannie sporządzonego raportu o wyjętej szynie makrofotografię jej przekroju.

#### 4. WNIOSKI

Przy właściwym utrzymaniu nawierzchni i racjonalnych zabiegach technologicznym, zwłaszcza zaś przy szlifowaniu szyn w takich terminach, które ograniczą rozwój ich wad kontaktowo-zmęczeniowych istnieje możliwość osiągnięcia trwałości szyn 60E1 w granicach  $600 \div 700$  Tg. Dokładne określenie częstotliwości szlifowania powinno być uzależnione od intensywności rozwoju zużycia falistego [4] i wyników obserwacji rozwoju wad wewnętrznych oraz powierzchniowych.

Dokładniejsze poznanie rozwoju wad umożliwiłoby zbudowanie narzędzi ułatwiających ocenę ryzyka pozostawiania w torze szyn, w których takie wady wykryto. Dzięki temu można by zapobiec występowaniu znacznej części przypadków nagłych i zwiększyć bezpieczeństwo jazdy.

Badania ukierunkowane na osiągnięcie tych celów wymagałyby czynnego włączenia się do obserwacji procesów uszkodzeń szyn zespołów defektoskopowych i dużej liczby osób zatrudnionych w eksploatacji nawierzchni. Bez rzetelnego zebrania setek dobrze udokumentowanych przykładów wyniki badań nie będą bowiem wystarczająco reprezentatywne dla różnych warunków charakteryzujących sieć PLK S.A.

#### LITERATURA

- [1] *Badania eksploatacyjne prototypowych rozjazdów zwyczajnych o promieniu 1200 i 500 m z krzyżownicą z ruchomym dziobem*. Praca zbior. CNTK, nr 3070/11, Warszawa 2004
- [2] Bałuch H.: *Numeryczna metoda prognozowania ciągłych wymian szyn*. Archiwum Inżynierii Lądowej 1973, nr 1
- [3] Bałuch H.: *Diagnostyka nawierzchni kolejowej*. WKŁ, Warszawa 1978
- [4] Bałuch H.: *System wspomaganie decyzji o szlifowaniu szyn "DOSZ", Cz. 1. Założenia i algorytm*. Praca CNTK nr 3134/11, Warszawa 2003
- [5] Bałuch H.: *Problemy monitorowania szyn i ich miejsce w systemie GIS-RAIL*. Problemy Kolejnictwa, zeszyt 140 Warszawa 2005
- [6] Bałuch M.: *Interpretacja pomiarów i obserwacji nawierzchni kolejowej*. Zakład Poligraficzny Politechniki Radomskiej. Monografie, Radom 2005
- [7] Bateman D.: *Rolling contact fatigue – the understanding process*. Railway Technical Review, 2006, No. 4



- [8] Burstov M.C., Watson A.S., Beatles M.: *Application of the whole railmodel to control rolling contact fatigue*. Rail Engineering, London 2002
- [9] Department of Transportation. *Rail*. TM-5628/AFR91-44, Chapter 7
- [10] Deshimaru T., Kataoka H., Abe N.: *Estimation of service life of aged continuous welded rail*. Quarterly Report of RTRI, 2006, No. 4
- [11] Dietrich I., Socha G.: *Monitorowanie rozwoju uszkodzeń zmęczeniowych w jednoosiowym i złożonym stanie naprężeń*. Seminarium CNTK „Właściwości szyn i ich znaczenie w eksploatacji w świetle wymagań europejskich“, Warszawa, 2005
- [12] Jeong D.Y.: *Analytical modelling of rail defects and its applications to rail defect management*. U.S. Department of Transportation, January 2003
- [13] Hempe T., Siefer T.: *Evaluation of rail grinding strategies by means of LCC analysis*. Railway Engineering International Edition 2006, No. 3
- [14] Kober H. *Instandhaltungs der Neubauustrecken der Deutsch Bundesbahn*. Eisenbahn Technische Rundschau 1986, No. 11
- [15] Lau A., Keefe R., Ravitharan S.S.S.: *Improving rail performance*. Internet [www.dot.state.il.us](http://www.dot.state.il.us).
- [16] Müller H., Neühofer W.: *Oberbauinstndhaltungstrategie im internationalen Vergleich*. Eisenbahn Technische Rundschau 1988, No. 9
- [17] Meuser K.: *Soderzhanie verhnego stroenija puti pri novoj sisteme mezhdunarodnogo passazhirskogo soobschenija*. Zheleznye Dorogi Mira 1981,
- [18] *Przyczyny złamań szyn w torze nr 1 na szlaku Wronki-Miały w km 66,380*. Praca zbior. CNTK pod kier. H. Bałucha, nr 4078/11, Warszawa 2004
- [19] Radomski R.: *Racjonalna gospodarka szynami w świetle badań eksploatacyjnych*. Sympozjum Naukowo-Techniczne Zakładu Dróg Kolejowych CNTK, Warszawa 1987
- [20] Radomski R.: *Analiza uszkodzeń szyn wraz z prognozowaniem ich trwałości eksploatacyjnej*. Drogi Kolejowe 1990, nr 12
- [21] Roney M.: *Controlling deep-seated shells on CPR*. Railway Track and Structures 2006, No. 6
- [22] Train derailment at Hadfield: A final report by the Independent Investigation Board. Office of Rail Regulation, July 2006
- [23] Triglia M.: *Fundamental diagnostics and technology*. European Railway Review 2006, No. 3
- [24] *Zwiększenie trwałości rozjazdów w drogach szynowych metodami eksploatacyjnymi*. Pr. zbior. pod kier. Marii Bałuch. Projekt Badawczy Min. N. i Sz. W. nr N509-001-31/0045