

Wybrane zagadnienia współpracy nawierzchni z podłożem podczas eksploatacji bezстыkowego toru kolejowego

Włodzimierz Andrzej Bednarek

Podczas eksploatacji bezстыkowego toru kolejowego ulega zmianie sposób współpracy nawierzchni z podłożem. Zmiana tego charakteru wynika głównie ze zmiennej odkształcalności podłoża gruntowego, zużywania się poszczególnych elementów nawierzchni kolejowej czy powstawania nierówności zarówno w torze jak i w samej szynie. W pracy przedstawiono wybrane zagadnienia takiej zmieniającej się współpracy nawierzchni z podłożem podczas eksploatacji bezстыkowego toru kolejowego. W szczególności omówiono następujące czynniki:

- zmiana podatności podłoża w ciągu roku,
- niejednorodność podłoża po długości toru,
- lokalne nierówności w torze i w szynie,
- zmniejszenie efektywności przyczepności koła na odkształconym torze,
- zużycie pionowe, boczne i faliste szyn.

Wymienione czynniki powodują niekorzystny wzrost naprężeń w poszczególnych współpracujących ze sobą elementach nawierzchni kolejowej oraz ich postępującą degradację. W pracy zawarto zespół wzrostu naprężeń, szczególnie widoczny w eksploatowanej szynie toru kolejowego.



dr inż.
Włodzimierz Andrzej Bednarek
Politechnika Poznańska
Wydział Budownictwa
i Inżynierii Środowiska
Zakład Budowy Mostów
i Dróg Kolejowych
e-mail: wlodzimierz.bednarek@put.poznan.pl

WSTĘP

W eksploatowanym torze może dochodzić do odkształceń podsypki i podtorza, co skutkuje nierównomiernym podparciem toru kolejowego [10,12]. Typowym następstwem jest powstawanie lokalnej utraty kontaktu toru z odkształconym lokalnie podłożem, a tym samym do powstawania na długości pewnych odcinków luk między podkładami a podsypką. Liczba tych luk i ich zasięg rosną wraz z czasem eksploatacji toru. Obciążenie taborem przywraca utracony kontakt toru z podłożem, ale zjawisku temu towarzyszy wzrost oddziaływań dynamicznych taboru na tor w zależności od wielkości pustek i prędkości jazdy pojazdu szynowego. Powstawanie luk w torze stwarza również niekorzystne warunki podparcia rusztu torowego, co ujemnie wpływa na np. stateczność eksploatowanego toru bezстыkowego [11].

Powstające nierówności toru powodują zaburzenia ruchu obrotowego koła, skutkujące obniżeniem trakcyjnej efektywności koła (stopień wykorzystania jego przyczepności wynikającej z nacisków statycznych podczas eksploatacji).

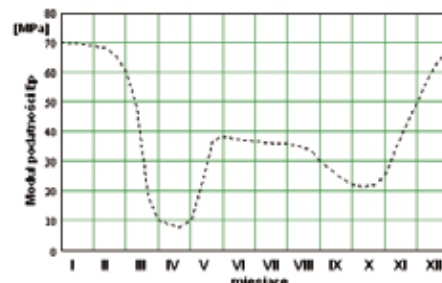
Podczas eksploatacji, wskutek kontaktu

koła pojazdu z szyną dochodzi do pionowego, bocznego i falistego zużycia szyny [6,16].

CZYNNIKI ZWIĘKSZAJĄCE ODDZIAŁYWANIA NA TOR

Zmiana podatności podłoża w ciągu roku

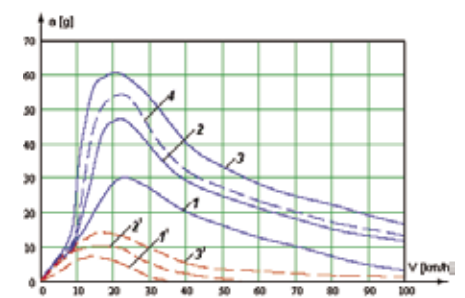
Analiza procesu zużycia czy deformacji toru kolejowego uzasadnia stwierdzenie, że z punktu widzenia pracy obciążonych elementów nawierzchni, zasadnicze znaczenie ma rozwój nierówności podłużnych. Nierówności te są następstwem odkształceń podsypki i podtorza oraz nierównomiernego podparcia toru na jego długości, powstających podczas procesu eksploatacji toru [18,19,34]. Zmiana warunków podparcia toru następuje również wskutek zmieniających się w zależności od pory roku stanów gruntów podtorza, co ilustruje rys. 1, przedstawiający zmianę modułu podatności gruntu w ciągu roku [27,37]:



1. Zmiany modułu podatności gruntu w ciągu roku [37]

Deformacje toru w płaszczyźnie pionowej są spowodowane głównie naciskami ciężkiego taboru towarowego, o dużym natężeniu ruchu ale mniejszych prędkościach niż pociągi pasażerskie.

Pora roku ma także znaczący wpływ na „sztywność toru” [8,21]. Zwiększenie jego podatności powoduje osłabienie sił dynamicznych działających na tor. Wniosek ten ma duże znaczenie eksploatacyjne. W okresie zimowym, podłożo sprężyste jest sztywniejsze, co skutkuje tym, że szyny częściej pękają od uderzenia płaskiego miejsca na kole (czemu sprzyja jeszcze obniżenie udarności stali szynowej). Zatem w okresie tym zestawy kołowe z płaskimi wytarciami obręczy, przekraczającymi dopuszczalną głębokość, powinny być natychmiast wycofywane z ruchu, co wynika z rys. 2.



2. Zmiany przyspieszeń przeciążających w warunkach letnich i zimowych [21]

Okres letni (sztywność toru 160 [MN/m]):

- 1' – płaskie wytarcie głębokości 1 mm,
- 2' – płaskie wytarcie głębokości 1,5 mm,
- 3' – płaskie wytarcie głębokości 2 mm,

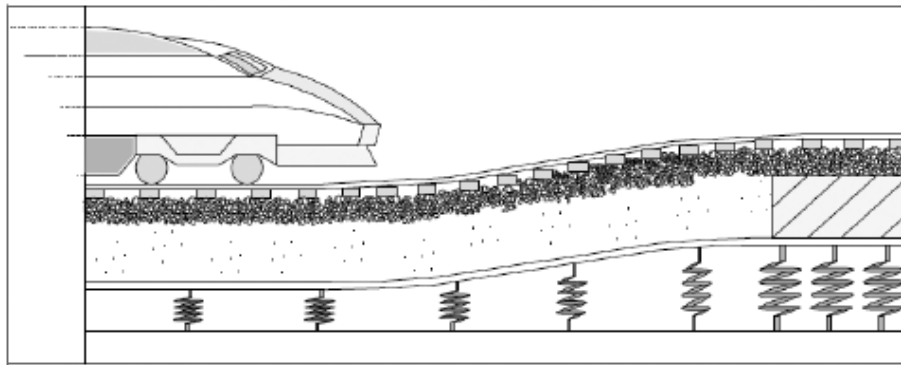
Okres zimowy (sztywność toru 40 [MN/m]):

- 1' – płaskie wytarcie głębokości 1 mm,
- 2' – płaskie wytarcie głębokości 1,5 mm,
- 3' – płaskie wytarcie głębokości 2 mm,

Krzywa 4 jest wykresem doświadczalnym dla koła z miejscem płaskim głębokości 1,5 mm dla warunków zimowych.



3. Przykłady deformacji w strefie przejściowej na dojeździe do obiektu inżynierskiego



4. Schemat zmiany sztywności nawierzchni przy dużej zmianie podatności podłoża

Maksymalna wartość naprężeń wywołanych płaskimi wytarciami występuje przy prędkości 25÷30 km/h [8,20,21]. Tak więc jazda z ograniczoną do 20 km/h prędkością nie zabezpiecza toru przed ujemnymi skutkami płaskich miejsc na kole. W torze w warunkach letnich jest zachowany charakter zmian przyśpieszeń (zależny od

prędkości). Największe przyśpieszenia występują przy prędkości jazdy 15÷20 km/h, jednak ich wartość jest około cztery razy mniejsza niż w okresie zimowym. Zatem z punktu widzenia pracy toru szczególnie niebezpieczne są uszkodzenia w postaci płaskich miejsc na kołach wagonów towarowych, poruszających się z mniejszą

prędkością i bardziej obciążonych. Dużego znaczenia nabierają zatem metody i przyrządy do pomiaru stanu i profilu kół pojazdów szynowych i główek szyn kolejowych [15,17,24,26].

Niejednorodność podłoża po długości toru

Występująca niejednorodność podłoża po długości toru kolejowego najczęściej spowodowana jest następującymi czynnikami:

- różnym rodzajem gruntów podtorza,
- różnym zagęszczeniem materiałów podsypkowych,
- wpływem eksploatacji taborem kolejowym,
- zmianą konstrukcji nawierzchni kolejowej.

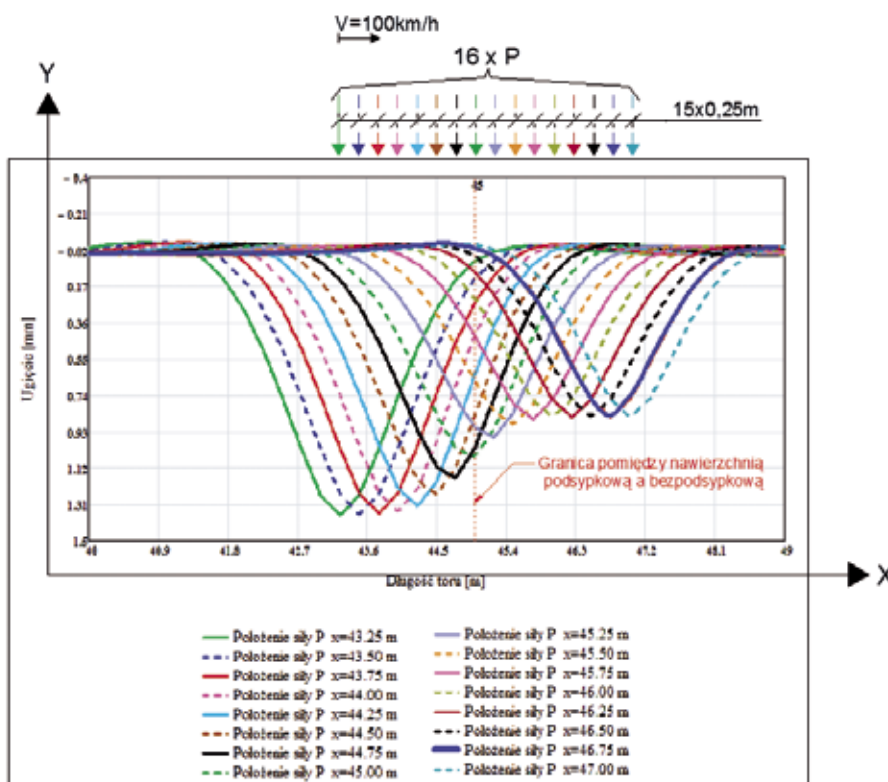
Dodatkowym miejscem zmieniającym charakter pracy toru kolejowego są strefy przejściowe np. przed obiektami mostowymi czy zmiana podatności przed i na przejeździe kolejowym (rys.3 i 4).

W ostatnich latach wprowadza się wiele nowych rozwiązań konstrukcyjnych, które pokazują nowe spojrzenie na technologie budowy toru, w miejscu występowania skokowej zmiany sztywności podłoża szyny przy np. dojazdach do przejazdów kolejowych czy obiektów mostowych [30,31]. Na rys. 5 przedstawiono przykładowy wykres ugięć toru na granicy nawierzchnia podsypkowa a bezpodsypkowa (analiza statyczna) [32]. Jak widać z wykresu ugięcia, skokowa zmiana podparcia szyny kolejowej, powoduje znaczną zmianę parametrów geometrycznych toru (np. osiadanie czy wichrowatość – biorąc pod uwagę jeszcze możliwość różnej pracy toków szynowych).

W Europie znajduje się szereg różnych rozwiązań stref przejściowych. Do najbardziej znanych rozwiązań można zaliczyć:

- technologia konstrukcji nawierzchni RHEDA,
- instalacja dodatkowych szyn pomiędzy szyny toczne na odcinku ok. 20 m przed wprowadzeniem nowej nawierzchni,
- stosowanie zabiegu sklejanie podsypki,
- umieszczanie pod podkładami rusztu stalowego (firma Rhomberg),
- zmiana długości podkładów przed oraz za obiektem inżynierskimi,
- strefa przejściowa w postaci płyty betonowej,
- strefa dojazdowa wzmocniona kolumnami cementowymi.

Niektóre stosowane rozwiązania pokazano na rys. 6.



2.5. Przykładowy wykres ugięć toru na granicy nawierzchnia podsypkowa a bezpodsypkowa [32] (analiza statyczna)

a)



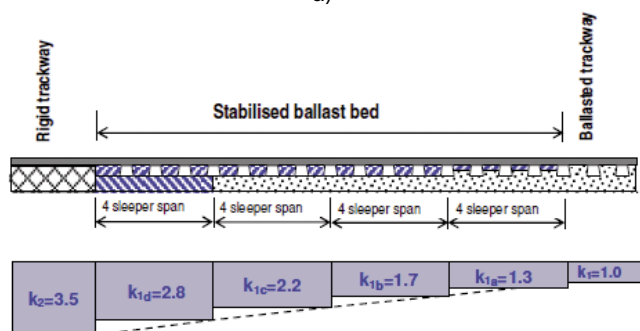
b)



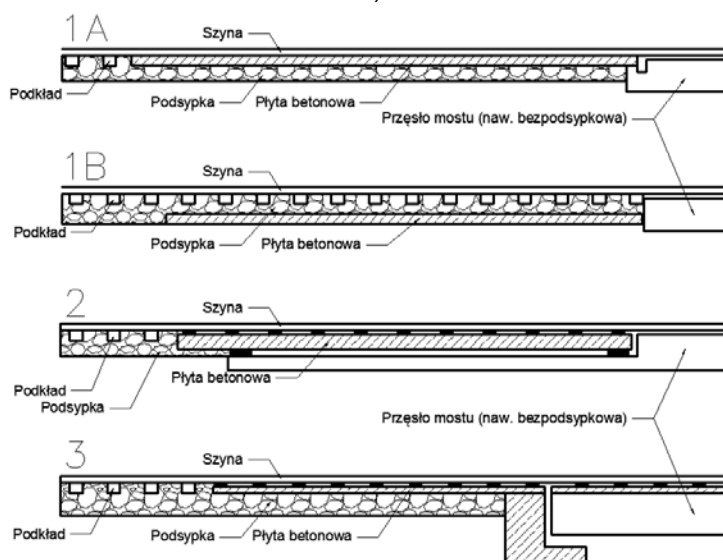
c)



d)



e)



f)



6. Przykłady rozwiązań stref przejściowych przed obiektami inżynieryjnymi

a) konstrukcja strefy przejściowej z dodatkowymi szynami wewnątrz

b) rozwiązanie strefy dojazdowej do nawierzchni w tunelu

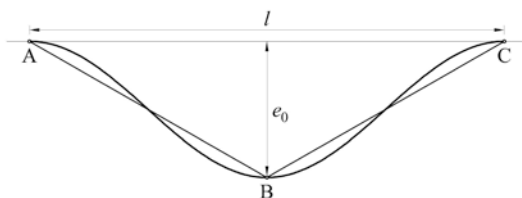
c) sklepanie podsyпки

d) schemat wzrostu sztywności podparcia nawierzchni w przypadku zastosowania sklepania podsyпки

e) rozmieszczenia płyty betonowej w torze

gdzie: **1A** - płyta betonowa stosowana bezpośrednio pod szyną, **1B** - płyta betonowa wylewana na torowisku, **2** - płyta wylewana pod szyną, ale nad płytą nawierzchni bezpodosypkowej (o zmiennym przekroju), **3** - płyta żelbetowa pod szyną na obiekcie

f) strefa dojazdowa wzmocniona kolumnami cementowymi.



7. Kształt pionowej nierówności toru szynowego: e_0 – głębokość nierówności, l – długość nierówności [28]

Nierówność pionowa toru ma postać:

$$z_n = e_0 \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot x}{l}\right), \text{ dla } 0 \leq x \leq l, \quad (2.1)$$

Zastępcza nierówność opisana jest równaniami prostych w postaci:

$$z_n^1 = e_0 \cdot \frac{2 \cdot x}{l}, \text{ dla } 0 \leq x \leq \frac{l}{2}, \quad (2.2)$$

$$z_n^2 = 2 \cdot e_0 \cdot \left(\frac{l-x}{l}\right), \text{ dla } \frac{l}{2} \leq x \leq l \quad (2.3)$$

Lokalne nierówności w torze

Podczas eksploatacji bezстыkowego toru kolejowego powstają deformacje (nierówności) zarówno w torze jak i np. w samej szynie. Poruszający się po nierównym torze tabor przywraca wprawdzie kontakt toru z podłożem, ale zjawisku temu towarzyszy wzrost oddziaływań dynamicznych taboru na tor. Wielkość tego wzrostu zależy przede wszystkim od kształtu powstałej nierówności i prędkości jazdy pojazdu szynowego, w znacznie mniejszym stopniu od konstrukcji zawieszenia pojazdu szynowego i odkształcenia kół pojazdów [28]. Odkształcenia pionowe toru mają kształt cosinusoidalny, który można dla uproszczenia obliczeń zastąpić liniami prostymi (rys. 7) [28].

W pracy [28] współczynniki k_d zwiększające oddziaływania na tor uzależniono od wymiarów powstającej w torze nierówności o głębokości e_0 i długości nierówności l . Wartości tych współczynników w zależności od wymiarów pojedynczej nierówności, w przypadku toru z podkładami drewnianymi można określić z wykresu na rys. 8, natomiast z podkładami betonowymi z wykresu na rys. 9. Jak widać na rys. 2.8 i 2.9 szczególnie niekorzystne są „krótkie” nierówności l o „dużej” głębokości e_0 .

W obliczeniach nawierzchni proponuje się przyjmowanie współczynników dynamicznych k_d z uwzględnieniem wpływu oddziaływania miejscowych nierówności toru w postaci:

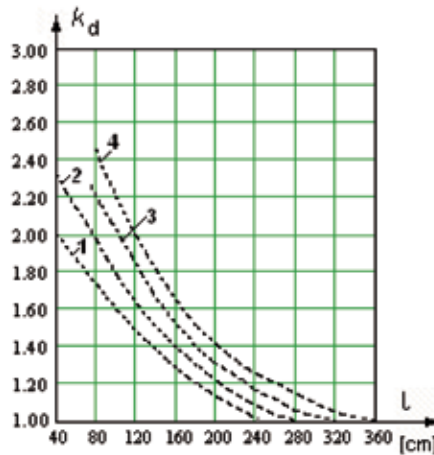
$$k_d = 1 + 0,000085 \cdot \frac{e_0}{l} \cdot V^2 \quad (2.4)$$

gdzie:

- e_0 – głębokość nierówności, [mm],
- l – długość nierówności, [m],
- V – prędkość jazdy, [km/h].

Na rys. 10 pokazano zależność współczynnika dynamicznego k_d od długości nierówności l dla wybranych głębokości nierówności e_0 i prędkości jazdy V .

Analizując widma pionowych nierówności toru otrzymuje się zależność wyrażającą wariację sił dynamicznych przekazywanych przez koło na szynę [36]:



1- $e_0=0,1$ cm; 2- $e_0=0,2$ cm; 3- $e_0=0,3$ cm; 4- $e_0=0,4$ cm

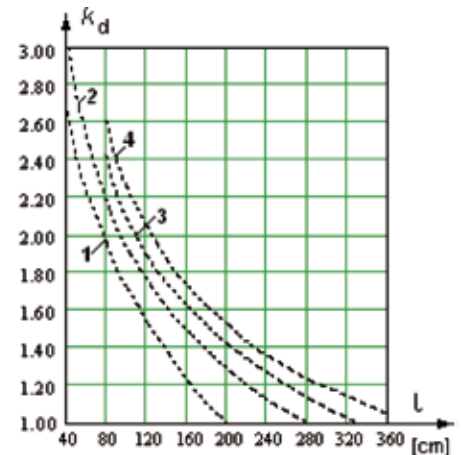
$$1 - k_d^d(l) = e^{0,86563 - 4,27852 \cdot 10^{-3} \cdot l + 2,88869 \cdot 10^{-6} \cdot l^2}$$

$$2 - k_d^d(l) = e^{1,05665 - 5,37629 \cdot 10^{-3} \cdot l + 5,48427 \cdot 10^{-6} \cdot l^2}$$

$$3 - k_d^d(l) = e^{1,26507 - 6,54489 \cdot 10^{-3} \cdot l + 7,98668 \cdot 10^{-6} \cdot l^2}$$

$$4 - k_d^d(l) = e^{1,39778 - 6,96947 \cdot 10^{-3} \cdot l + 8,62184 \cdot 10^{-6} \cdot l^2}$$

8. Wykres zależności współczynnika k_d od wymiarów nierówności toru na podkładach drewnianych i prędkości pojazdu [28]



1- $e_0=0,1$ cm; 2- $e_0=0,2$ cm; 3- $e_0=0,3$ cm; 4- $e_0=0,4$ cm

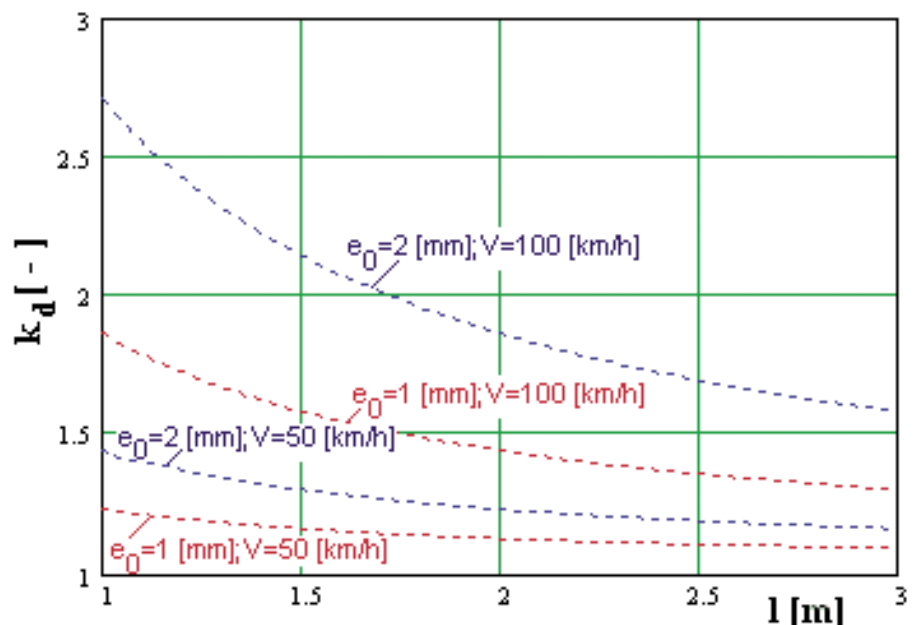
$$1 - k_d^b(l) = e^{1,31287 - 8,88861 \cdot 10^{-3} \cdot l + 1,20466 \cdot 10^{-5} \cdot l^2}$$

$$2 - k_d^b(l) = e^{1,42825 - 8,96916 \cdot 10^{-3} \cdot l + 1,44343 \cdot 10^{-5} \cdot l^2}$$

$$3 - k_d^b(l) = e^{1,34067 - 6,68898 \cdot 10^{-3} \cdot l + 8,21756 \cdot 10^{-6} \cdot l^2}$$

$$4 - k_d^b(l) = e^{1,39592 - 6,41525 \cdot 10^{-3} \cdot l + 7,47801 \cdot 10^{-6} \cdot l^2}$$

9. Wykres zależności współczynnika k_d od wymiarów nierówności toru na podkładach betonowych z przekładkami z gumy o grubości 20 mm i od prędkości pojazdu [28]



10. Zależność współczynnika dynamicznego k_d od długości nierówności l dla wybranych głębokości nierówności e_0 i prędkości jazdy V

$$\sigma_d^2 = 2,6 \cdot 10^{-6} \cdot v^2 \cdot m_n \cdot C_s [N^2] \quad (2.5)$$

gdzie:

v – prędkość jazdy, [m/s],

m_n – masa niesprężynowana pojazdu, [kg],

C_s – współczynnik sprężystości toru, [N/m].

Równanie to ma zastosowanie do analizy zjawiska dla przypadków dużych prędkości jazdy, dla których szczególne znaczenie mają oddziaływania wywołane nierównościami o krótkich falach odkształcenia [36].

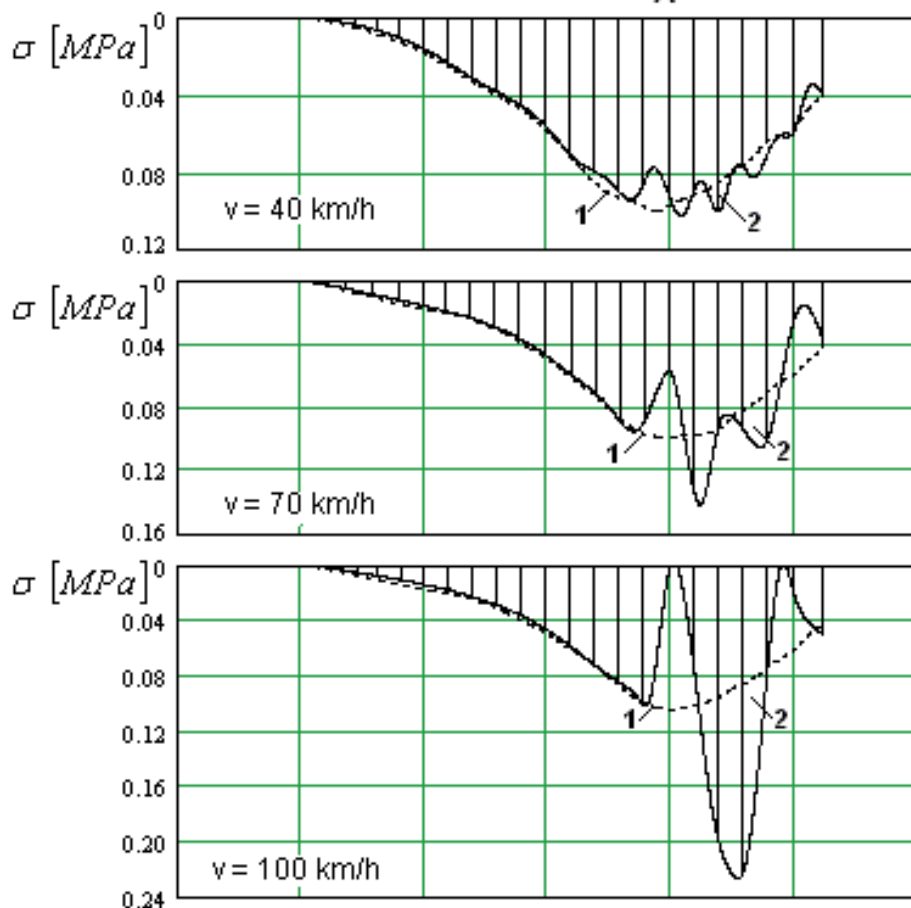
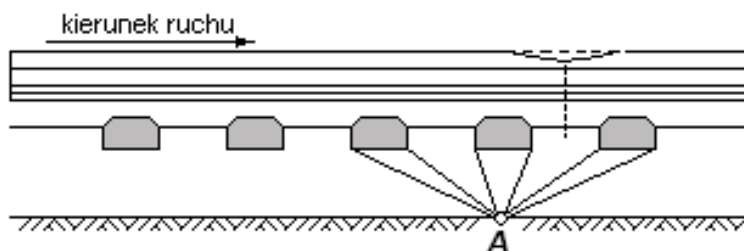
Miejscowe odkształcenia powierzchni szyny i koła

Na wielkość oddziaływań dynamicznych bardzo istotny wpływ mają nierówności toru (przede wszystkim krótkie nierówności pionowe) będące powodem zwiększenia naprężeń w podtorzu nawet 2,6 raza w stosunku do obciążeń statycznych. Punkt torowiska, gdzie oddziaływania są największe, znajduje się zawsze przed środkiem nierówności w kierunku ruchu pojazdu (rys. 2.11).

W przypadku średniego pochylenia nierówności toru mniejszego od 1 [‰] przy długości nierówności co najmniej 2 [m], dodatkowe obciążenia nie występują [29]. Nierówność geometryczną główki szyny i przejazd koła przez taką nierówność rozważano w pracy [33].

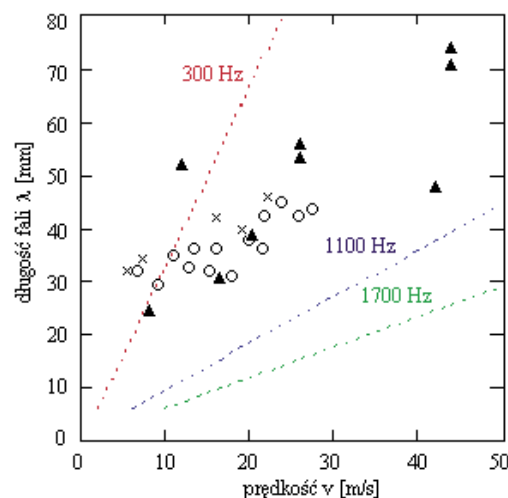
Zużycie faliste szyny

Podczas eksploatacji, wskutek kontaktu koła pojazdu z szyną dochodzi oprócz pionowego i boczego zużycia szyny, do niekorzystnego falistego zużycia szyny [6]. Zużycia faliste szyn [16,23,25] są źródłem zwiększonych oddziaływań dynamicznych między kołem a szyną, przenoszących się zarówno na tabor, jak i na nawierzchnię oraz podtorze. Powodują one



11. Naprężenia pod podsypką [29]:

1 – szyna bez nierówności, 2 – szyna z nierównościami o średnim pochyleniu 10 ‰

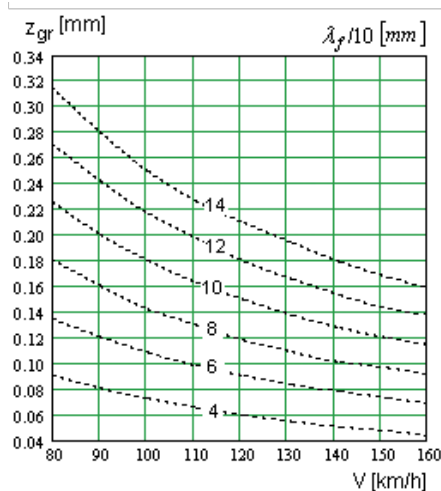


12. Zależność długości fali zużycia falistego od prędkości [9]

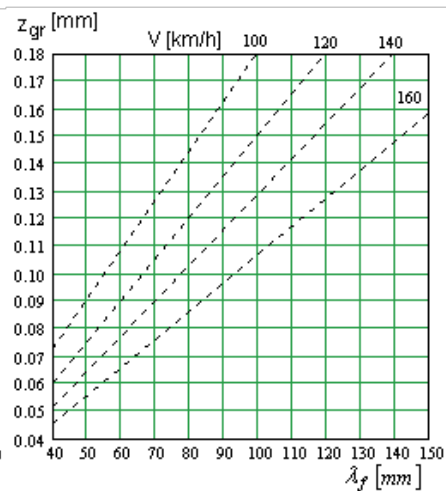
○ - BR survey (1991)

× - Vancouver 'Skytrain' (1992)

▲ - Harrison (1979)



13. Graniczna wartość prędkości przy falistym zużyciu szyn na dłuższym odcinku toru



14. Graniczna wartość prędkości przy falistym zużyciu szyn w miejscu złamania szyny

gdzie: λ_f – długość nierówności zużycia falistego szyny,
 z_{gr} – graniczne pionowe zużycie szyny.

niszczenie podsypki i pozostałych elementów składowych nawierzchni oraz są powodem szybszego zużycia się taboru kolejowego. Doświadczenia wskazują, że zjawisko to występuje między innymi na szynach, po których kursują szybkie pociągi pasażerskie, a ruch towarowy jest ograniczony lub wcale nie występuje.

Typowe zużycie faliste może być wyrażone jako funkcja prędkości pojazdu szynowego v oraz charakterystyki częstotliwościowej f według wzoru $L=v/f$ (rys. 12).

Ze względu na zwiększone oddziaływania dynamiczne między kołem a szyną, określono graniczne wartości prędkości przy tym rodzaju zużycia szyny, co pokazano na rys. 13 i 14 [1].

Jak widać na rys. 13, szczególnie niekorzystne dla ruchu pociągów są krótkie fale o stosunkowo dużej głębokości (amplitudzie). Koniecznością zatem staje się pomiar i monitorowanie stanu szyn kolejowych [2,7,13,24] i stanu toru, a także zwiększenie trwałości i niezawodności szyn i toru kolejowego [3,26]. Najskuteczniejszym sposobem usuwania już istniejącego w szynie zużycia falistego szyn jest ich szlifowanie lub napawanie [1,35].

Jak widać z przedstawionej analizy wskutek eksploatacji toru dochodzi do zmiany sposobu współpracy nawierzchni kolejowej z podłożem, co powoduje przede wszystkim:

- zmniejszenie efektywności przyczepności koła na odkształconym torze,
- wzrost naprężeń w obciążonych elementach nawierzchni kolejowej,
- nadwyżki dynamiczne działające na tor kolejowy,
- postępujące zużycie i degradację nawierzchni kolejowej.

Zmniejszenie efektywności przyczepności koła na odkształconym torze

Powstające nierówności toru powodują zaburzenia ruchu obrotowego koła. Wpływa to na trakcyjną efektywność koła, rozumianą jako stopień wykorzystania jego przyczepności wynikającej z nacisków statycznych podczas eksploatacji [22]. Dla przypadku ruchu koła po torze nierównym sinusoidalnie (rys. 15) mamy:

$$\zeta(l) = a \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{L} \cdot l + \vartheta\right), \text{ gdzie: } \vartheta$$

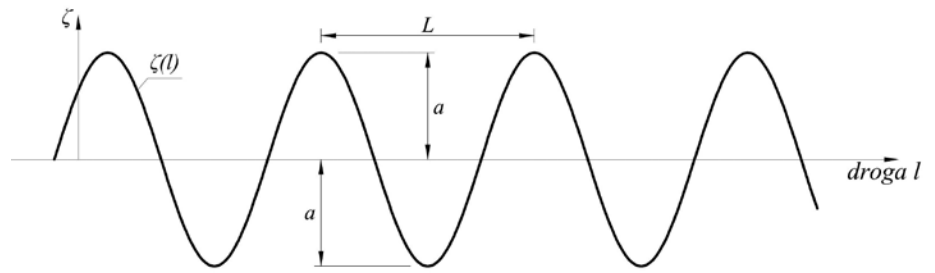
– początkowy kąt obserwacji zjawiska [22]; przyjęto $\vartheta = 0$.

Prędkość zaburzeń ruchu obrotowego koła, poruszającego się po nierówności harmonicznej wynosi [22]:

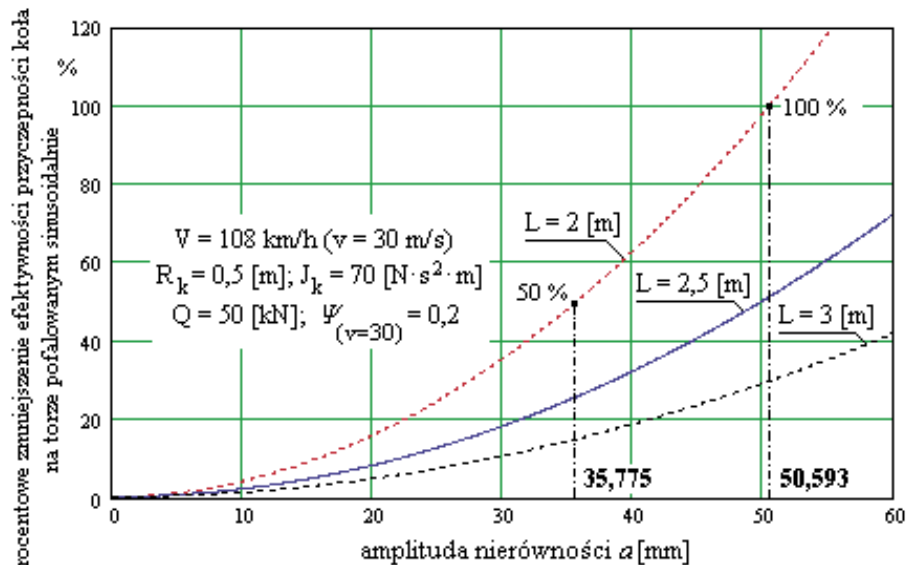
$$\dot{\Omega}^* = -4 \cdot \frac{\pi^3}{L^3} \cdot \frac{v^2 \cdot a^2}{R_k} \cdot \sin\left(\frac{4 \cdot \pi}{L} \cdot l\right)$$

(2.6)

gdzie: a , l , L – jak na rys. 2.15; v , R_k



15. Odształcenie toru opisane sinusoidą [22]



16. Zmniejszenie efektywności przyczepności koła na odkształconym torze

– odpowiednio prędkość i promień koła pojazdu.

Amplituda momentu harmonicznego zaburzenia ruchu koła, o momencie masowym bezwładności J_k wynosi:

$$|A_M^*| = J_k \cdot 4 \cdot \frac{\pi^3}{L^3} \cdot \frac{v^2 \cdot a^2}{R_k} \quad [22].$$

Moment przyczepności koła do szyny wynosi: $M_\Psi = \Psi(t) \cdot Q \cdot R_k$. W wyniku obliczeń porównawczych otrzymujemy:

$|A_M^*| = c \cdot M_\Psi$, gdzie: c - zmniejszenie efektywnego wykorzystania przyczepności koła na odkształconym torze [%].

Odształcenie toru opisane sinusoidą, powodujące zmniejszenie przyczepności koła z szyną, pokazano na rys. 16.

Przy nacisku koła na szynę $Q=50$ [kN], na długości 2 [m] oraz wartości współczynnika przyczepności $\Psi_{(v=30)}=0,2$, otrzymujemy znaczące obniżenie efektywności przyczepności przy amplitudzie większej od 5 [mm], a teoretyczny 50 % brak przyczepności przy $a_{gr}=35,775$ mm, gdzie: a_{gr} – graniczna amplituda odkształconego toru. Zwiększenie nacisku koła powoduje zmniejszenie tego niekorzystnego zjawiska.

Spadek trwałości nawierzchni i nadwyżki dynamiczne

Podczas eksploatacji parametry geometryczne toru ulegają zmianie [5]. Wzrastająca wartość syntetycznego wskaźnika jakości

toru J , będąca obiektywną oceną stanu jego utrzymania wiąże się ze spadkiem trwałości nawierzchni (rys. 17a) czy powstawaniem nadwyżek dynamicznych działających na tor (rys. 17b).

Pogarszający się stan toru, powstające nadwyżki dynamiczne, zużycia i miejscowe odkształcenia powierzchni tocznej koła i szyny są główną przyczyną powstawania uszkodzeń szyn. Analizy tych uszkodzeń przeprowadzone w oparciu o informacje o uszkodzeniach zebrane z odcinków o długości około 50 km, pozwalają opisać przebieg zjawiska rozkładem Weibulla o dystrybucji w określonej postaci [36]:

$$F(Q) = 1 - \exp\left(-\frac{Q^\delta}{\theta}\right) \quad (2.7)$$

gdzie:

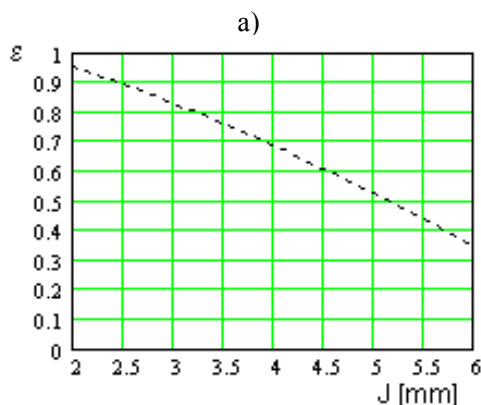
Q - obciążenie ruchem, [Tg],

δ - parametr kształtu,

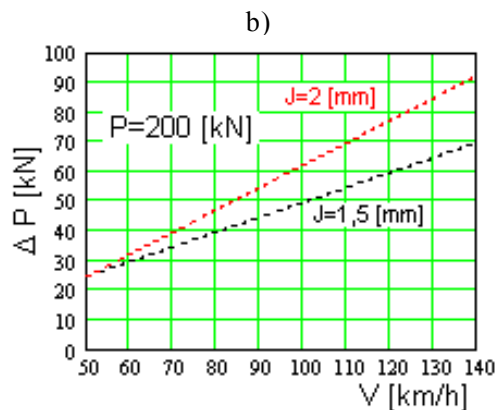
θ - parametr skali.

Analiza wykresów skumulowanej częstości rejestrowanych uszkodzeń szyn w siatce funkcyjnej rozkładu Weibulla, umożliwiła prognozowanie postępującego procesu uszkodzeń szyn oraz określenie granicznego obciążenia ruchem [36].

Czynniki wymienione w tym punkcie pracy są ważne z punktu widzenia bezpieczeństwa toru podczas jego eksploatacji.



$$\varepsilon(J) = 4,1 \cdot 10^{-4} \cdot J^3 - 1,4 \cdot 10^{-2} \cdot J^2 - 6 \cdot 10^{-2} \cdot J + 1,12$$



$$\Delta P(V) = 12 + 0,06 \cdot P + 0,5 \cdot (V - 50) \cdot (J - 0,5)$$

P – nacisk na oś [kN]

17. Wpływ stanu toru J na spadek trwałości nawierzchni i nadwyżki dynamiczne [4]

Wzrost naprężeń w obciążonej szynie nawierzchni kolejowej

W punkcie 2 pracy przedstawiono wybrane powstające podczas eksploatacji odkształcenia i zużycia o zwiększonym oddziaływaniu na tor kolejowy, powodujące uszkodzenia elementów nawierzchni kolejowej. Działanie ich jest szczególnie widoczne w pracy szyny toru kolejowego. Szyna taka w eksploatowanym torze kolejowym poddawana jest działaniu wielu niekorzystnych czynników [8,21]. Niektóre z nich wynikają z obciążeń od nacisków pojazdów, inne oddziałują głównie w czasie eksploatacji np. nierówności szyny, koła czy nierówności całego toru kolejowego. Oszacowanie wartości naprężeń w szynach dla przeciętnych

warunków eksploatacyjnych kolei europejskich (w zakresie obciążenia i konstrukcji nawierzchni) znajdujemy w pracach [14,21], (patrz dane w tabl. 1).

Jak widać z tabl. 1 największy wzrost naprężeń w szynie, oprócz naprężeń kontaktowych, powodują przede wszystkim powstające deformacje toru kolejowego, płaskie miejsca na kole, zmiany temperatury czy pełzanie szyn. Pogarszające się podczas eksploatacji parametry geometryczne toru, opisane syntetycznym wskaźnikiem jakości toru, powodują spadek trwałości nawierzchni czy powstawanie nadwyżek dynamicznych działających na tor. Czynniki zwiększające oddziaływania dynamiczne na tor (np. miejscowe odkształcenia powierzchni szyny i koła) są istotne z punktu widzenia pracy toru podczas jego eksploatacji.

Podsumowanie

Współzależność stanu taboru i toru powoduje w procesie eksploatacyjnym skumulowany przyrost odkształceń, które naruszają spokojność jazdy pojazdów. Powstające nierówności w torze wraz z pogarszaniem się jego stanu obniżają trwałość nawierzchni i powodują powstawanie nadwyżek dynamicznych działających na tor. Ocenę ich oddziaływań na pracę szyny toru bezстыkowego przedstawiono w tabl. 1.

Powstające nierówności powodują, że podczas ruchu pojazdu pojawiają się dodatkowe, szkodliwe czynniki np. wężykowanie lokomotywy, jej kołysanie czy podskakiwanie. Kształt powstającej nierówności powoduje obniżenie efektywności trakcyjnej koła pojazdu,

Tabela 1

Rodzaj i efekt obciążeń	Przyczyny wywołujące naprężenia oraz orientacyjne wartości naprężeń [MPa]	Zasięg oddziaływania
1	2	3
1. Obciążenie pionowe: - zginanie szyny - zginanie główki względem szyjki - naprężenia kontaktowe	100 60 ~ 1000	do kilku m (5 m) do kilku cm (0,2 m) do kilku cm
2. Obciążenie poziome: - zginanie szyny - zginanie główki względem szyjki - naprężenia kontaktowe	100 100 ~ 1000	do kilku m (2,7 m) do kilkudziesięciu cm (0,7 m) do kilku cm
3. Obciążenie siłami podłużnymi: - zginanie szyny - zginanie główki względem szyjki	5 20	do kilku m (2 m) do kilku cm (0,1 m)
4. Wadliwy kształt obręczy kół	do 300	-
5. Mimosrodowe obciążenie pionowe i poziome (skręcanie szyny):	do 60	do 0,8 m
6. Zmiany temperatury względem temperatury przytwierdzenia	do 150	-
7. Różnica temperatury główki i stopki szyny	do 15	-
8. Pełzanie szyn	do 100	-
9. Naprężenia własne	do 200 (najczęściej ok. 60)	-
10. Naprężenia technologiczne (układanie szyn)	do 50	-
11. Naprężenia od wyłukowania szyny w łukach o małych R	do 50	-
12. Nierówności toru w płaszczyźnie pionowej	nawet ponad 3-krotny wzrost naprężeń od sił pionowych	zależny od kształtu deformacji (rys. 2.8÷2.9)

rozumianej jako stopień wykorzystania jego przyczepności wynikającej z nacisków statycznych. Wskutek znacznej sztywności toru kolejowego powstają obszary braku kontaktu toru z podłożem, co stwarza niekorzystne warunki jego podparcia, ujemnie wpływając np. na stateczność eksploatowanego toru bezстыkowego. Płaskie wytarcia obręczy w zestawach kołowych mają bezpośredni wpływ na naprężenia powstające w nawierzchni, a zwłaszcza w szynach. Takie wytarcia są jedną z głównych przyczyn pękania szyn, szczególnie w porze zimowej, przy niskich temperaturach [21]. Przy splocie niekorzystnych czynników (niska temperatura, zły stan urosorowania wagonu, duży nacisk koła na szynę) mogą powodować masowe uszkodzenia szyn. Wpływ sztywności nawierzchni kolejowej na pionowe zużycie szyn jest istotny i za najlepszą uważa się sztywność 100÷150 kN/mm [36]. Koła taboru o mniejszych średnicach zwiększają ryzyko uszkodzeń powierzchni szyn. Zwiększenie prędkości jazdy pojazdów skutkuje wzrostem liczby uszkodzeń szyn, spowodowanych dużą częstotliwością uderzeń. ◀

Materiały źródłowe

- [1] Bałuch H.: System doradczy w ocenie celowości szlifowania szyn. *Problemy Kolejnictwa*, nr 118, 1995,
- [2] Bałuch H.: Konieczność budowy systemu monitorowania szyn. VI Seminarium Diagnostyki Nawierzchni Szynowych. Politechnika Gdańska, Jurata 2004,
- [3] Bałuch H.: Wybrane zagadnienia trwałości i niezawodności szyn kolejowych. III Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Techniczna „Spawalnictwo dróg szynowych oraz materiały, wykonawstwo, odbiory”, Warszawa–Bochnia 2007,
- [4] Bałuch H.: Uproszczona metoda relatywnej oceny obciążeń drogi kolejowej. Praca Instytutu Kolejnictwa nr 4511/61 wykonywana na zlecenie Urzędu Transportu Kolejowego, Warszawa, grudzień 2011,
- [5] Bałuch M.: Estymacja nierówności toru kolejowego. *Archiwum Inżynierii Lądowej*, nr 3–4, 1989,
- [6] Bałuch M.: Ustalanie dopuszczalnych nacisków osi i maksymalnych prędkości na liniach PKP. *Prace Centrum Naukowo-Technicznego Kolejnictwa*, z. 139, Warszawa 2003,
- [7] Bałuch M.: Interpretacja przekroczeń odchyłek dopuszczalnych nawierzchni. XII Konferencja Naukowa „Drogi Kolejowe”, 2003,
- [8] Bałuch M.: Hipotetyczna ocena stanu naprężeń w szynach. VI Seminarium Diagnostyki Nawierzchni Szynowych. Politechnika Gdańska, Jurata 2004,
- [9] Bhaskar A., Johnson K.L., Wood G.D., Woodhouse J.: Wheel–rail dynamics with closely conformal contact. Part 1: Dynamic modelling and stability analysis. *I. Mech. E. Proc. Inst. Mech. Engr. Vol. 211, Part F*, 1997,
- [10] Bednarek Wł.: Local unevenness of lengthwise profile influence on stability conditions of continuous welded rail track. *Foundations of Civil and Environmental Engineering*, Poznań University of Technology, No. 10, 2007,
- [11] Bednarek Wł.: Wpływ lokalnych nierówności profilu podłużnego na warunki stateczności bezстыkowego toru kolejowego. *Archiwum Instytutu Inżynierii Lądowej 3/2007, materiały XIV Konferencji Naukowo-Technicznej „Drogi Kolejowe 2007”, Poznań–Rosnówko, 2007,*
- [12] Bednarek Wł.: Local subgrade unevenness of lengthwise profile influence on work conditions of CWR track. *Foundations of Civil and Environmental Engineering (FCEE)*, Poznań University of Technology, No. 15, 2012,
- [13] Bogdaniuk B.: Pomiar nierówności powierzchni tocznej szyn na liniach PKP. *Problemy Kolejnictwa*, nr 120, 1995,
- [14] Czyczuła Wł.: Analiza stanu naprężeń w szynach na podstawie modeli uproszczonych. *Drogi Kolejowe*, nr 12, 1988,
- [15] Grabczyk J., Madejski J., Gołaszewski A.: Mikroprocesorowe przyrządy do pomiarów profilu kół pojazdów szynowych, główek szyn i rozjazdów. *Przegląd Kolejowy*, nr 3, 1998,
- [16] Grassie S.L., Kalousek J.: Rail corrugation: characteristics, causes and treatments. *Journal of Rail and Rapid Transit, Proc. Inst. Mech. Eng., Vol. 207F*, 1993,
- [17] Iwnicki S.D., Bevan A.J.: Damage to Railway Wheels and Rails: A Review of the Causes, Prediction Methods, Reduction and Allocation of Costs. *The International Journal of Railway Technology*, Vol. 1, Issue 1, 2012,
- [18] Krużyński M., Piotrowski A.: Badania zagęszczalności materiałów podsypkowych. *ZNPP*, Nr 41, 1995,
- [19] Krużyński M., Kopiński M., Piotrowski A.: Prognozowanie osiadań i deformacji pionowych toru kolejowego. *Przegląd Kolejowy*, nr 8, 1996,
- [20] Lesiak P., Podsiadło R.: Symulacyjne badania dynamicznego oddziaływania koła z płaskim miejscem na szynę w środowisku UNIVERSAL MECHANIZM LOCO. *Logistyka*, 6, 2011,
- [21] Łoś M.: Wpływ temperatury na pracę toru kolejowego. *WKiŁ*, Warszawa 1974,
- [22] Madej J.: Teoria ruchu pojazdów szynowych. *Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej*, Warszawa 2004,
- [23] Massel A.: Faliste zużycie szyn a warunki eksploatacyjne. *Problemy Kolejnictwa*, nr 127, 1998,
- [24] Matejak W., Moszczyński R.: Problematyka szyn z wadami stwierdzonymi w czasie badań defektoskopowych. *Materiały seminaryjne VI Seminarium diagnostyki nawierzchni szynowych*, Gdańsk–Jurata 2004,
- [25] Sato Y., Matsumoto A., Knothe K.: Review on rail corrugation studies. *Elsevier Science B.V., Wear*, 253, 2002,
- [26] Sawley K.: Managing profiles to extend both wheel and rail life. *Railway Track and Structures*, No. 9, 2001,
- [27] Siewczyński Ł.: Zagadnienia współpracy nawierzchni kolejowej z podtorzem gruntowym. *Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej*, Poznań 1974,
- [28] Skrzyński E.: Wpływ dużego obciążenia ruchem oraz zwiększonych szybkości pociągów na pracę podtorza. *Problemy Kolejnictwa*, nr 67, 1975,
- [29] Skrzyński E., Sikora R.: Kolejowe budowle ziemne – tom I. *WKiŁ*, Warszawa 1990,
- [30] Sołkowski J.: Wpływ parametrów mechanicznych nawierzchni kolejowej na ugięcia szyny w strefach przejściowych. *Materiały VIII Ogólnopolskiej Konferencji „Nowoczesne technologie i systemu zarządzania w kolejnictwie”*, Zakopane, 2009,
- [31] Sołkowski J., Kudła D.: Wykonawstwo stref przejściowych do obiektów mostowych i aspekty modelowania numerycznego oddziaływania pojazd–nawierzchnia–podtorze. *Zeszyty Naukowo-Techniczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji Rzeczpospolitej Polskiej*, Oddział w Krakowie, Seria: Materiały Konferencyjne, Nr 2(101)/2013, Kraków 2013,
- [32] Sołtysiak W.: Analiza ugięcia szyny wskutek znacznej zmiany jej podparcia na długości bezстыkowego toru kolejowego. Praca magisterska (napisana pod kierunkiem dr inż. Wł. Bednarka), Poznań, 2013,
- [33] Timoshenko S.: Method of analysis of static and dynamical stresses in rail. *Proceeding of the Second International Congress for Applied Mechanics*, Zurich, Switzerland 1926,
- [34] Towpik K.: Obliczanie dynamicznych charakterystyk nawierzchni z uwzględnieniem zmiennych warunków podparcia toru. *Drogi Kolejowe*, nr 4, 1982,
- [35] Towpik K.: Szlifowanie szyn w świetle doświadczeń zagranicznych. *Problemy Kolejnictwa*, nr 118, 1995,
- [36] Towpik K.: Infrastruktura drogi kolejowej. Obciążenia i trwałość nawierzchni. *Biblioteka Problemów Eksploatacji*, Warszawa–Radom 2006,
- [37] Wiłun Z.: *Mechanika gruntów i gruntownictwo drogowe*, Warszawa 1967.