

ZARYS METODYKI BADANIA SZTYWNOŚCI NAWIERZCHNI I PODTORZA W STREFACH PRZEJŚCIOWYCH DO OBIEKTÓW INŻYNIERSKICH ORAZ NA OBIEKTACH¹

Juliusz Sołkowski

dr inż., Katedra Infrastruktury Transportu Szybowego i Lotniczego, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska, 31-155 Kraków, ul. Warszawska 24, tel: +48 12 628 2157, e-mail: jsolkow@pk.edu.pl

Sergiusz Lisowski

mgr inż., Katedra Infrastruktury Transportu Szybowego i Lotniczego, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska, 31-155 Kraków, ul. Warszawska 24, tel: +48 12 628 2158, e-mail: slisows@pk.edu.pl

Aleksandra Pawlak-Burakowska

mgr inż., Katedra Infrastruktury Transportu Szybowego i Lotniczego, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska, 31-155 Kraków, ul. Warszawska 24, tel: +48 12 628 2158, e-mail: apawlak@pk.edu.pl

Maciej Jamka

mgr inż. DIAKOM S.C, 30-898 Kraków, ul. Sucharskiego 15, e-mail: diakom@interia.eu

Streszczenie. *W artykule przedstawiono wyniki badań poligonowych sztywności nawierzchni kolejowych oraz ich podłoża w obrębie przyczółków i w strefach przejściowych, wykonane pod sterowanym obciążeniem lokomotywami poruszających się z różnymi prędkościami i w różnych kierunkach. Opisano zastosowaną metodykę pomiarową, która stanowi propozycję procedury postępowania przy odbiorach oraz diagnostyce stref przejściowych dla różnych rozwiązań konstrukcyjnych z punktu widzenia wielkości i zmienności efektu progowego.*

Słowa kluczowe: *strefa przejściowa, sztywność nawierzchni i podtorza kolejowego, efekt progowy*

1. Wstęp – cel pracy

Celem pracy jest przedstawienie bieżącego stanu wdrażania metodyki określania sztywności nawierzchni kolejowych oraz ich podłoża (rozumianego jako obiekt inżynierski lub podtorze) w obrębie przyczółków obiektów mostowych i w strefach przejściowych. Metodyka ta jest w trakcie opracowywania na podstawie badań prowadzonych w Katedrze Infrastruktury Transportu Szybowego i Lotniczego Politechniki Krakowskiej (KITSiL) z uwzględnieniem bieżącego stanu wiedzy w zakresie nawierzchni, podtorza i obiektów z punktu widzenia współpracy z nawierzchnią i budowlami ziemnymi.

Badania te w zamierzeniu autorów mają wypełnić lukę w polskich przepisach dotyczących nawierzchni, podtorza oraz obiektów inżynierskich (szczególnie

1 Wkład autorów w publikację: Sołkowski J. 70%, Lisowski S. 10%, Pawlak-Burakowska A. 10%, Jamka M. 10%

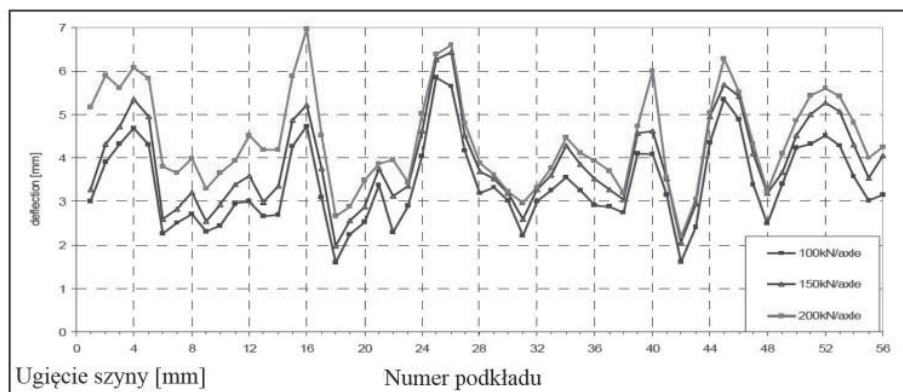
[18]), które nie podają definicji sztywności nawierzchni, ani – tym bardziej – w jaki sposób ją sprawdzać. Badania te powinny dać wykładnię dla prawidłowego interpretowania zapisów [18] o dopuszczalnych różnicach sztywności nawierzchni oraz długości tzw. stref przejściowych. Po dalszym dopracowaniu proponowana metodyka mogłaby stać się rutynową procedurą odbiorową oraz diagnostyczną stref przejściowych, a także służyć do oceny różnych rozwiązań konstrukcyjnych z punktu widzenia wielkości efektu progowego i jego zmienności w trakcie eksploatacji dla oceny trwałości konstrukcji.

2. Efekt progowy

Efekt progowy jest postrzegany jako zespół niekorzystnych zjawisk w postaci nadmiernych deformacji, oddziaływań dynamicznych, zużycia oraz uszkodzeń elementów nawierzchni, podtorza i obiektu. Występują one w miejscach łączenia różnych typów nawierzchni szynowych – tzw. nawierzchni podsypkowych z bezpodsypkowymi (przegląd typów nawierzchni np. w [1]) – względnie w miejscach łączenia nawierzchni tego samego typu, ale ułożonych na różnych podłożach, np. podłoże ziemne (podtorze), względnie obiekt inżynierijny [7]. Literatura dotycząca tych zagadnień cały czas rośnie [5, 15, 19].

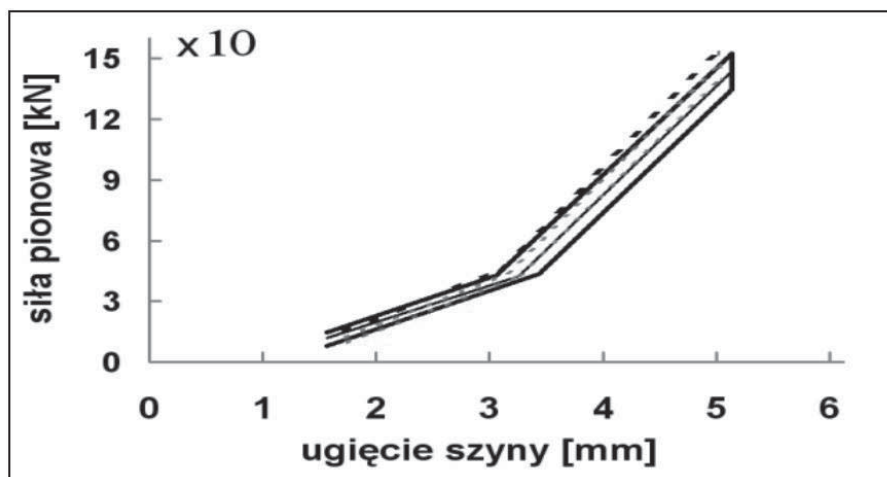
Efekt progowy jest na ogół analizowany przez pryzmat różnicy sztywności pomiędzy nawierzchniami, względnie układami nawierzchnia-podłoże. Zagadnienie sztywności nawierzchni pojawia się także w kontekście jej trwałości, również poza strefami przejściowymi – por. np. [12]. W zakresie stref przejściowych rozwiązania konstrukcyjne mają tworzyć *rampe*, która powinna posiadać odpowiedni gradient sztywności lub/i nierówności geometrycznej. Zgodnie z [18] długość strefy przejściowej wynosi 20 m, a dopuszczalna różnica sztywności układów nawierzchnia-podłoże na obiekcie i w strefie przejściowej wynosi 30%. Nie podaje się jednakże jak wyznaczyć sztywność nawierzchni i jej podłoża oraz jak zbadać „płynność” zmiany sztywności. Może się okazać, że na wspomnianej długości dochodzi do kilkukrotnej zmiany sztywności, gdyż w przypadku nawierzchni podsypkowej należy liczyć się z dużą jej niejednorodnością [6] (rys. 1). Stwierdzono także, że problem efektu progowego nie można sprowadzić jedynie do różnicy sztywności pomiędzy nawierzchniami łączonymi [20]. Istotnym może się okazać efekt zmiany długości fali zginania i wiążące się z nim odbicie fali od granicy nawierzchni. Potrzebna jest zatem także kontrola długości fali zginania.

Obecnie stosowane systemy nawierzchni bezpodsypkowych charakteryzują się regulowanymi sztywnościami, dzięki czemu – zgodnie z deklaracjami producentów – mogą być „dostrojone” do sztywności nawierzchni podsypkowych [1, 4, 22]. Jednakże nie wiadomo w jakim okresie eksploatacji toru. Jak pokazuje praktyka, parametry mechaniczne nawierzchni podsypkowych w znacznie większym stopniu niż nawierzchni bezpodsypkowych, zmieniają się w trakcie eksploatacji oraz zależą od temperatury, wilgotności i zanieczyszczenia podsypki.



Rys. 1. Ugięcie szyny na długości toru obejmującej 56 podkładów dla trzech wartości nacisków osi 100/150/200 kN (duże różnicowanie sztywności układu nawierzchnia-podłoże) {6}

Ponadto należy uwzględnić efekty dynamiczne takie jak zmiana sztywności (zwykle usztywnienie) nawierzchni pod wpływem obciążeń ruchomych wywołujących przemieszczenia o dużej prędkości co „włącza” do układu tłumienie. Może ono wpływać znacząco na zmiany sztywności układu zmieniając relacje sztywności pomiędzy nawierzchniami podsypkowymi i bezpodsypkowymi – te ostatnie wykazują na ogół znacznie większy wzrost sztywności. Powstaje problem wyznaczenia tzw. sztywności dynamicznej, która zależy zarówno od drgań niskiej częstotliwości (fale zginania) oraz od drgań wysokich częstotliwości (i małych amplitud), które wpływają na zmianę sztywności układu nawierzchnia-podłoże (por. rys. 2). Zatem prawidłowe badania sztywności układów nawierzchnia-podłoże mogą być jedynie dynamiczne – w sprzężeniu z pojazdem na konkretnym odcinku toru. Powinny także uwzględniać czynnik czasu, czyli zagadnienia degradacji obu typów nawierzchni łączonych i ich podłoża.



Rys. 2. Sztywność nawierzchni (quasistatyczna) wg badań {10}

3. Wyznaczanie sztywności układu nawierzchnia-podłoże

W najprostszym ujęciu sztywność nawierzchni przy założeniu liniowej charakterystyki podłoża, nazywana także współczynnikiem odsprężynowania, określona jest jako stosunek siły pionowej przyłożonej do szyny do jej ugięcia. Najczęściej wykorzystuje się teorię belki Bernoulliego-Eulera na podłożu sprężystym Winklera, mimo znanych braków tego ujęcia w opisie pracy nawierzchni szynowej. W przypadku analizy stref przejściowych w pobliżu przyczółków obiektów mostowych należy się także liczyć z występowaniem zwiększonej siły wzdłużnej w szynach w torze bezстыkowym (obiekt bez przyrządów wyrównawczych) w wyniku termicznej zmiany długości przęsła. W tym przypadku sztywność nawierzchni jest określona jako:

$$k = 2U \sqrt{L^2 + \frac{N}{4EI}} \quad \text{gdzie} \quad L = \sqrt[4]{\frac{4 \cdot EI}{U}} \quad (1)$$

gdzie:

N - siła wzdłużna w szynach, (+) oznacza rozciąganie,

L - wsp. względnej sztywności podłoża i szyny,

EI - sztywność zginania szyny,

U - współczynnik podłoża szyny.

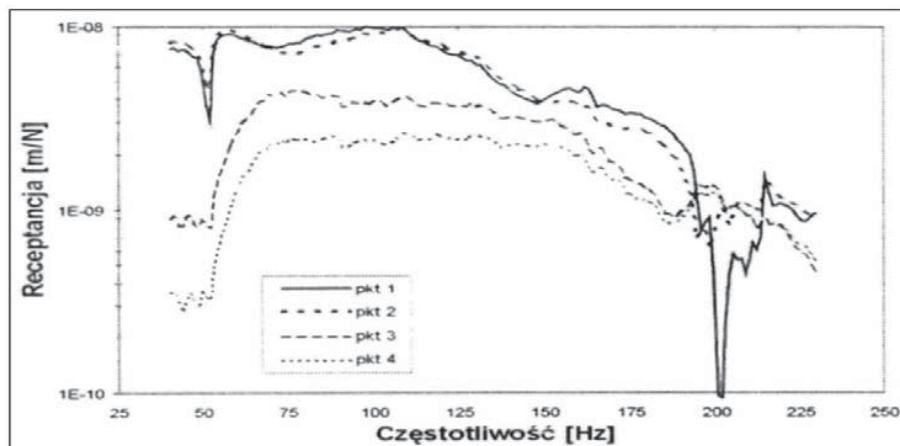
Dla przyrostu temperatury szyny 27°C , zmniejszenie sztywności wynosi około 5% w stosunku do wartości przy pominięciu siły wzdłużnej.

Praktyczne określenie sztywności nawierzchni (łącznie z podtorzem) może być wykonane bezpośrednio, jako badania stacjonarne, za pomocą aparatury umieszczonej w torze lub za pomocą aparatury umieszczonej na specjalnym pojeździe, w trakcie jazdy (por. przegląd [3]).

Wyznaczenie sztywności w danym przekroju poprzecznym toru nie jest łatwe z uwagi na konieczność wyeliminowania wpływu sąsiednich osi przy badaniu (jeśli obciążenie stanowi wagon lub lokomotywa z wózkami co najmniej dwuosiowymi). Biorąc pod uwagę niejednorodność nawierzchni i podtorza można uzyskać pewną wartość uśrednioną. Dodatkowym utrudnieniem jest nieliniowy charakter odpowiedzi układu nawierzchnia-podtorze [6, 10, 13, 16], szczególnie dla słabszych nawierzchni oraz występowanie luk pod podkładami. Wymaga to zastosowania obciążenia o różnej wielkości. Obciążenie mniejsze ma za zadanie zamknąć luki oraz wstępnie docisnąć szynę. Sztywność wyznaczana jest dla obciążenia o wartościach zbliżonych do użytkowych (zazwyczaj powyżej około 100 kN/oś), operuje się więc zlinearyzowaną charakterystyką, tzw. sztywnością sieczną.

Przeglądy bezpośrednich (stacjonarnych) metod pomiarowych podane są w [2, 13]. Wykonuje się bezpośrednie pomiary ugięcia szyny pod znanym obciążeniem lub pomiar odkształceń szyny (np. stopki), wyznaczając stąd naprężenie i moment zginający (druga pochodna ugięcia szyny). Po dwukrotnym scałkowaniu można uzyskać linię ugięcia lub „dopasowywać” teoretyczny wykres momentów (wyko-

rzystując liniową teorię belki na podłożu sprężystym) do uzyskanego i stąd wyznacza się sztywność podłoża – tzw. współczynnik podłoża szyny obejmujący przekładkę podszynową, sztywność podsypki i podtorza. Dodatkowym elementem jest niemożliwość oddzielenia sztywności nawierzchni od podłoża, wyznaczone są zatem współczynniki łączne dla układu nawierzchnia-podłoże (podtorze względnie obiekt).

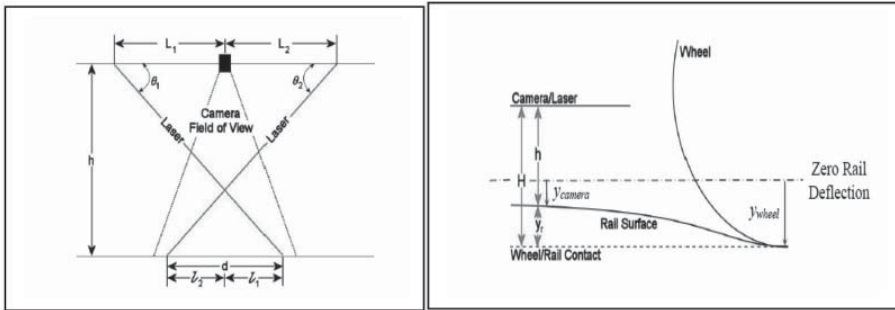


Rys. 3. Receptancja toru (interpretowana jako odwrotność sztywności) przy badaniach dla częstotliwości wzbudzenia drgań do 250 Hz [10]

Jeśli chodzi o pomiary wykonywane w trakcie jazdy (przykłady podano na rys. 4 - 7), wykorzystuje się w tym celu specjalnie skonstruowane urządzenia montowane na pojazdach lub wagony pomiarowe. Bez względu na sposób pomiaru, należy dysponować modelem pojazdu i toru.

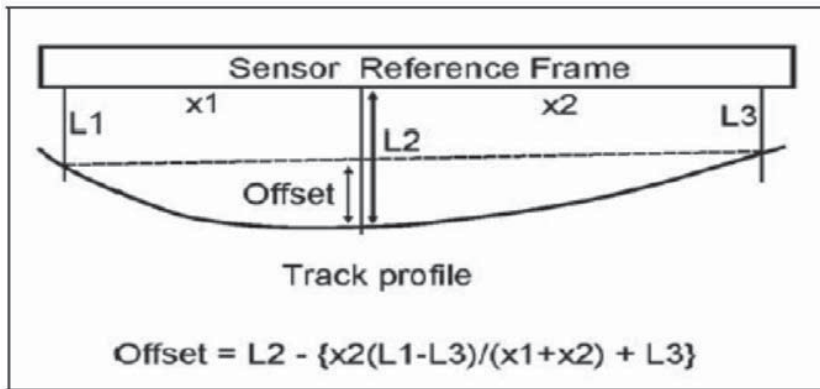
W [9, 23] mierzone są ugięcia szyny (rys. 4) z wykorzystaniem kamery i laserów, których promienie padają na szynę pod znanym kątem. W zależności od ugięcia szyny zmienia się odległość pomiędzy miejscami odbicia tych promieni (d). Kamera jest umieszczona na stałe (bez sprężynowania) na wysokości H . Odległość (d) jest monitorowana przez kamerę i na podstawie zależności geometrycznych wyznaczana jest odległość od kamery do szyny (h), stąd $y_r = H - h$. Odległość y_{camera} jest wyznaczona dla szyny bez obciążenia. Ugięcie szyny jest obliczane jako $y_{wheel} = y_{camera} + y_r$. Pomiar odbywa się w odległości 1.25 m od styku koła z szyną. Model pojazdu jest potrzebny do uwzględnienia wpływu sąsiedniej osi na ugięcie (wózek dwuosiowy). Prędkość pojazdu 50 km/h.

Innym sposobem zastosowania pomiarów z wykorzystaniem laserów jest pomiar [14], w którym specjalny wagon wyposażony jest w dodatkową oś w środku wagonu, która może być opuszczana i podnoszona siłownikiem hydraulicznym dając naciski statyczne w zakresie 4-267 kN. Sztywność toru wyznaczana jest z różnicy ugięć wywołanych dużym naciskiem oraz małym naciskiem (który ma za zadanie zamknąć luki pod podkładami oraz zmniejszyć wpływ nierówności szyn). Potrzebne są dwie jazdy wagonu pomiarowego z prędkością do 16 km/h.

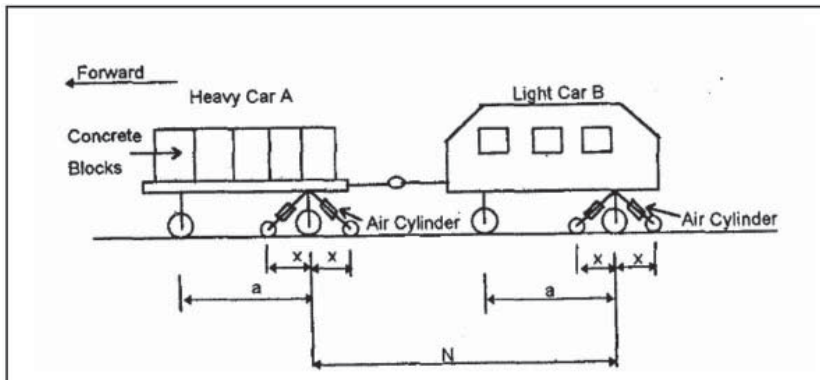


Rys. 4. Zasada laserowego pomiaru ugięcia szyny z pojazdu [23]

Nieco inną metodę pomiarową (Chiny) przedstawiono w [25], gdzie ugięcie wyznaczone jest z zależności geometrycznych (rys. 5). Do wyznaczania sztywności brana jest różnica ugięć szyny pod wagonem ciężkim i lekkim. Ugięcie jest wyznaczone z zależności geometrycznych. Prędkość pomiaru do 60 km/h.

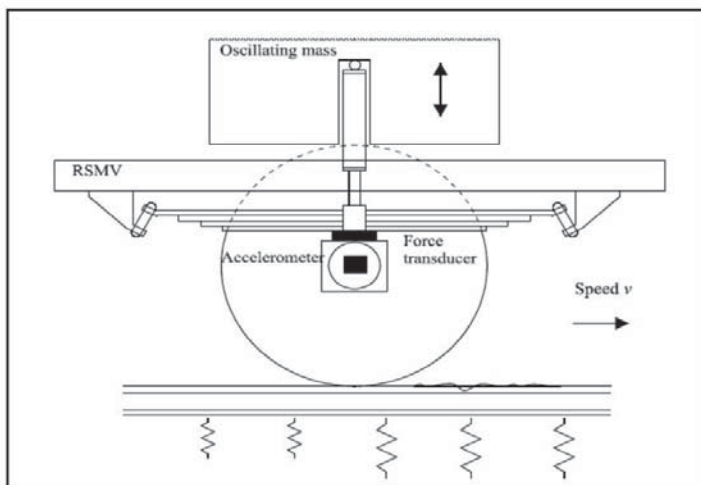


Rys. 5. Laserowy pomiar ugięcia szyny z pojazdu, jako przemieszczenia pionowego (L_2) pod dodatkową osią obciążaną siłownikiem hydraulicznym [14]



Rys. 6. Pomiar ugięć szyny pod osią z wykorzystaniem dwóch wagonów (lekkiego i ciężkiego) [25]

Na innej zasadzie oparta jest metoda przedstawiona w [21]. Sztywność wyznaczana jest z pomiaru przyspieszeń osi wagonu oraz siły nacisku koła wagonu, który jest wyposażony w układ oscylujących mas. Prędkość do 50 km/h.



Rys. 7. Wyznaczanie sztywności toru i podłoża z wielkości dynamicznych mierzonych na pojeździe pod oscylującą w kierunku pionowym masą [21]

Rozwijane są także inne metody, np. na kolejach francuskich [11], szwajcarskich [26], która przypomina metodę chińską oraz w Czechach [24], gdzie zastosowano przebudowaną podbijkarkę, podobnie jak wcześniej w Holandii [8], gdzie obecnie opracowywana jest metoda laserowego pomiaru prędkości przemieszczenia szyny [17], z której wyznacza się ugięcie. Metoda ta ma być mniej wrażliwa na nierówności szyny, choć pozostaje problem luk pod podkładami.

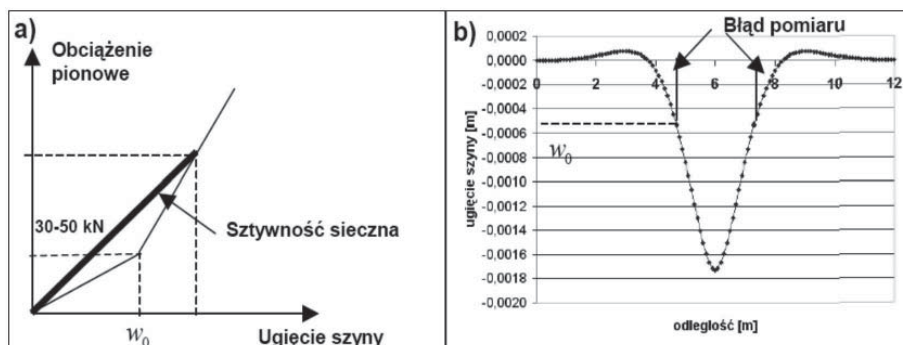
4. Założenia ogólne. Wielkości mierzone

Badania prowadzone w KITSiL są stacjonarne. Ogólne założenia są następujące:

- 1) badanie sztywności układu nawierzchnia-podłoża wykonywane na odcinku poza wpływem obiektu, w strefie przejściowej oraz na obiekcie,
- 2) badania mają charakter porównawczy – tzn. badane są **względne niejednorodności** sztywności na w/w odcinkach,
- 3) stosowana jest teoria belki B-E na podłożu Winklera jako model toru,
- 4) wykonywane są pomiary:
 - a) nierówności pionowych szyny (bez obciążenia),
 - b) ugięcia statycznego szyny pod znanym obciążeniem próbnym,
 - c) ugięcia dynamicznego szyny pod obciążeniem próbnym poruszającym się ze zróżnicowanymi prędkościami,
 - d) przyspieszeń pionowych szyny i podkładów (względnie samej szyny przy nawierzchniach bezpodsypkowych).

Statyczna sztywność układu nawierzchnia-podłoże jest wyznaczana jako sztywność sieczna (rys. 8). Pomiar ugięcia szyny wykonywany jest w dwóch etapach:

- pomiar zerowy bez obciążenia, jeśli nie stwierdzono występowania luk pod podkładami, (uzyskuje się tzw. „profil geometryczny”),
- z niewielkim obciążeniem, jeśli stwierdzono występowanie luk pod podkładami (uzyskuje się tzw. „profil statyczny”),
- oraz pomiar pod dużym obciążeniem (ponad 180 kN/oś).



Rys. 8. a) Założenie liniowości układu, b) błąd przy wyznaczaniu sztywności siecznej

Ugięcie statyczne szyny

Ugięcie szyny z korektą z uwagi na oś sąsiednią bez luk pod podkładami jest obliczane jako:

$$w_s^{(2)} = w_p^{(2)} - w_{kor} - w_o^{(0)} \quad (2)$$

oraz w przypadku występowania luk pod podkładami:

$$w_s^{(2)L} = w_p^{(2)} - w_{kor} - w_o^{(1)} \quad (3)$$

gdzie:

$w_o^{(0)}$ – wartość referencyjna wysokości główki szyny bez obciążenia,

$w_o^{(1)}$ – wysokość główki szyny z małym obciążeniem,

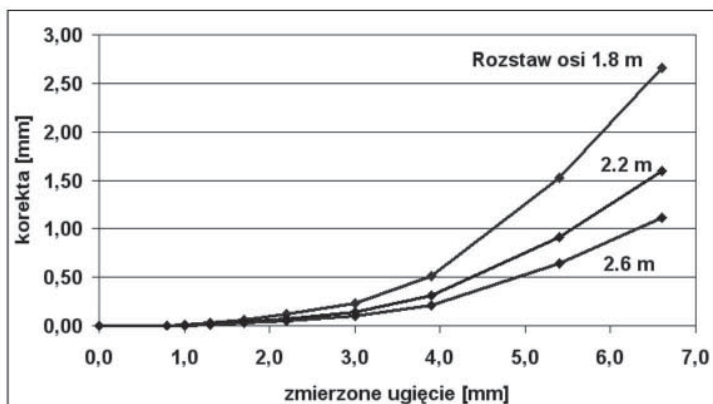
$w_p^{(2)}$ – wysokość główki szyny pod obciążeniem dużym,

w_{kor} – korekta ugięcia szyny uwzględniająca wpływ osi sąsiednich, wg. rys. 9.

Wartość korekty została wyznaczona na podstawie obliczeń analitycznych dla referencyjnego obciążenia 200 kN/oś oraz dla różnych stanów podłoża szyny. W przypadku pominięcia korekty z uwagi na występowanie osi sąsiednich uzyskuje się całkowite wartości ugięć szyny odpowiednio jako:

$$w_s^{(2)*} = w_p^{(2)} - w_o^{(0)} \quad (4)$$

$$w_s^{(2)L*} = w_p^{(2)} - w_o^{(1)}$$



Rys. 9. Wartości korekty ugięcia w_{kor} [mm] w zależności od zmierzonego ugięcia oraz rozstawu osi pojazdu przyjętego do wyznaczania sztywności układu nawierzchnia-podłoże (nacisk osi 200 kN).

Sztywność układu nawierzchnia-podłoże w j -tym przekroju toru (przypadająca na jeden tok szynowy) wyznaczana jest jako:

$$k_j = \frac{P}{w_{sr'j}} \quad (5)$$

oraz współczynnik podłoża szyny jako:

$$U_j = \frac{1}{4} \sqrt[3]{\frac{k_j^4}{EI}} \quad (6)$$

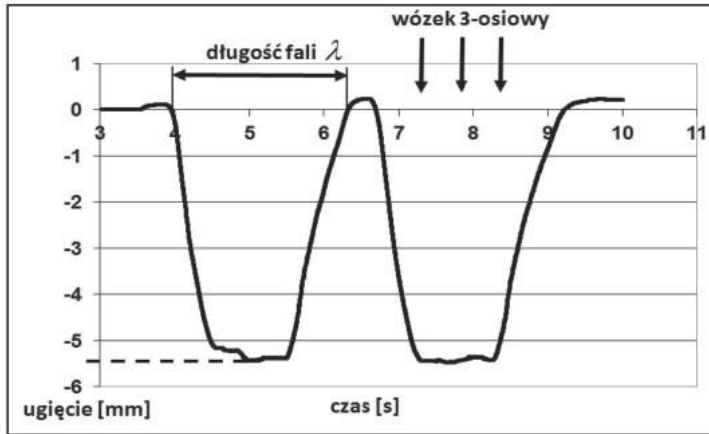
przy czym: P [kN]- nacisk statyczny koła, $w_{sr'j}$ [m] - średnie ugięcie szyny w danym przekroju wyznaczone z korekty ugięcia z uwagi na oś sąsiednią w dwóch przypadkach: bez luk pod podkładami lub z lukami.

Ugięcie dynamiczne szyny

Pomiar ugięcia dynamicznego szyny wykonywany jest przy pomocy przyrządu MSPL-01 (rys. 6.6). Ponieważ nie mierzone są dynamiczne naciski osi, zatem nie wyznacza się sztywności dynamicznej, a jedynie porównywane są charakterystyki ugięcia dynamicznego:

- ugięcia (amplitudy ugięcia) dynamicznego wraz z ewentualnym ugięciem wynikającym z luk pod podkładami (rys. 10), pomiar wykonywany bez korekty z uwagi na oś sąsiednią,
- długości fali zginania (rys. 10).

Ograniczenie badania do ugięcia szyny, bez wyznaczania sztywności, wynika z założenia porównawczego charakteru pomiarów na długości rozpatrywanego odcinka toru (rys. 9). Jeśli względne ugięcia szyny na danym odcinku toru będą mieściły się w granicach dopuszczalnych można wnioskować z dużym prawdopodobieństwem o zachowaniu różnic sztywności w granicach dopuszczalnych. W przypadku występowania luk pod podkładami, zmierzone wartości ugięć szyny będą większe niż w przypadku braku luk, zatem porównywanie samych ugięć da wyniki po stronie „bezpiecznej” tzn. różnice sztywności mogą być zawyżone w stosunku do faktycznie występujących.



Rys. 10. Przykładowy wykres ugięcia dynamicznego szyny (ET-22, prędkość $v=10\text{ km/h}$), punkt PKT 2 (rys. 13)

Każdorazowo, w danym przekroju, wielkość samych luk może być oszacowana jako różnica ugięć z pomiarów dynamicznych i statycznych (bez korekty z uwagi na oś sąsiednią):

$$\Delta w_d = w_d - w_s^{(2)L^*} \quad (7)$$

gdzie:

w_d - ugięcie dynamiczne mierzone od stanu bez obciążenia (po wyzerowaniu czujnika przed obciążeniem próbnym) lub, statycznie, jako różnica pomiędzy „profilem statycznym” a „profilem geometrycznym”:

$$\Delta w_s = w_0^{(1)} - w_0^{(0)} \quad (8)$$

gdzie:

$w_0^{(0)}$ - wysokość główki szyny nieobciążonej,

$w_0^{(1)}$ - ugięcie szyny pod małym obciążeniem wstępnym dla zamknięcia luk (około 60 kN/oś).

Przyspieszenia pionowe szyny i podkładów

Przyspieszenia pionowe mierzone są w trzech obszarach: na obiekcie, w strefie przejściowej i przed strefą, w co najmniej trzech przekrojach. Na podstawie pomiarów określone są wartości skuteczne przyspieszeń w poszczególnych przekrojach:

$$a_{RMS}^j = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\bar{a} - a_i)^2} \quad (9)$$

gdzie:

a_{RMS}^j - przyspieszenie skuteczne w j -tym przekroju toru,
 \bar{a} , a_i - przyspieszenie średnie oraz i -ta wartość przyspieszenia,
 N - liczba pomiarów.

5. Przyjęte miary niejednorodności układu nawierzchnia-podłoże

Sztywność nawierzchni i jej podłoża

Warunek dopuszczalnej różnicy sztywności podłoża kolejowego może być sprawdzony statycznie pomiędzy j -tymi przekrojami jako:

$$\Delta k_{j,j+1} = \frac{k_{j+1} - k_j}{k_j} \cdot 100\% \quad (10)$$

gdzie:

k_j - sztywność układu nawierzchnia-podłoże w j -tym przekroju (wzór 5),

lub dynamicznie jako porównanie ugięć (przekroje j.w.):

$$\Delta w_{d j,j+1} = \frac{w_{d j+1} - w_{d j}}{w_{d j}} \cdot 100\% \quad (11)$$

Dodatkowo proponowane wielkości (obliczane analogicznie) to:

- różnica długości fali zginania,
- różnica wartości skutecznych drgań szyny i podkładów.

6. Przykłady badań. Zastosowany sprzęt pomiarowy

Poniżej przedstawione są wyniki badań sztywności układu nawierzchnia- podłoże pod obciążeniem statycznym i dynamicznym. W przypadku pomiarów ugięć dynamicznych, które posłużyły do obliczeń sztywności dynamicznej założono, że nadwyżka dynamiczna nacisku osi jest pomijalnie mała (prędkości do 60 km/h).

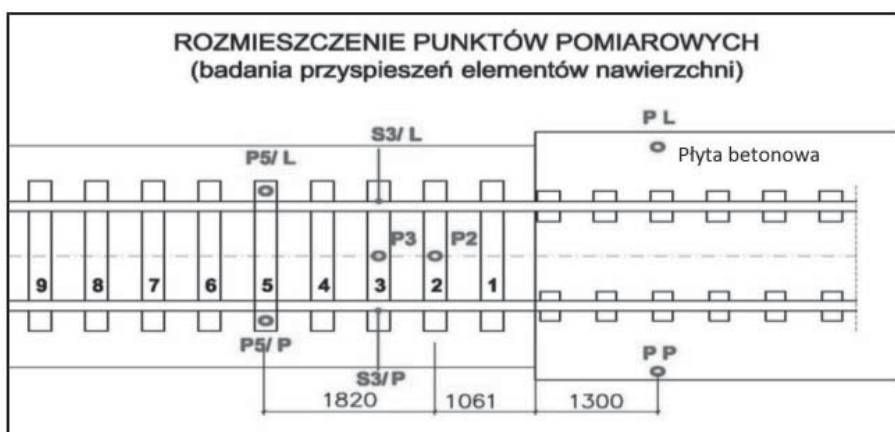
Badania na eksploatowanych torach zostały wykonane pod obciążeniem dynamicznym dwoma typami lokomotyw (SM-42 oraz ET-22) poruszających się z róż-

nymi prędkościami i w różnych kierunkach (najazd oraz zjazd z obiektu) oraz pod obciążeniem wagonem do przewozu tłucznia ciągniętym przez drezynę. Badania przeprowadzono w okresie czerwiec-listopad 2010 roku oraz we wrześniu 2012 roku w trzech lokalizacjach (rys 11-14):

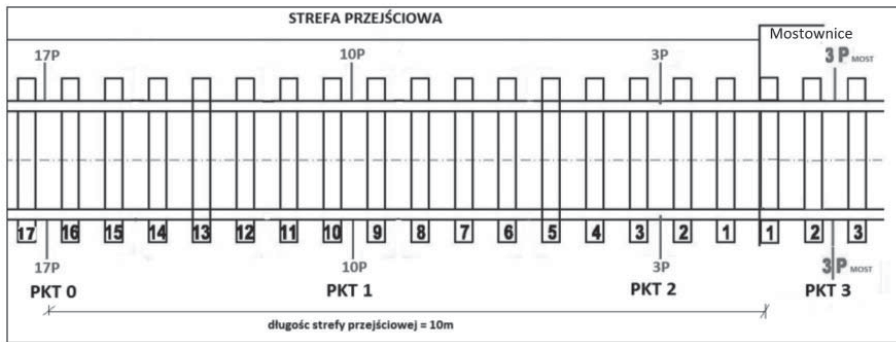
- w Ruszcy koło Krakowa, tor nr 224, linia 95 Kraków Mydlniki-Podłęże (zmiana typu nawierzchni na betonową),
- w Oświęcimiu, tor nr 1, km 61.986, linia 94 Kraków-Oświęcim (most na rzece Soła z nawierzchnią na mostownicach),
- w Krakowie, tor nr 2, linia nr 100 (obwodowa), obiekty nad al. Pokoju (z korytem balastowym) oraz trzy obiekty z mostownicami w tym most na rzece Wisła.



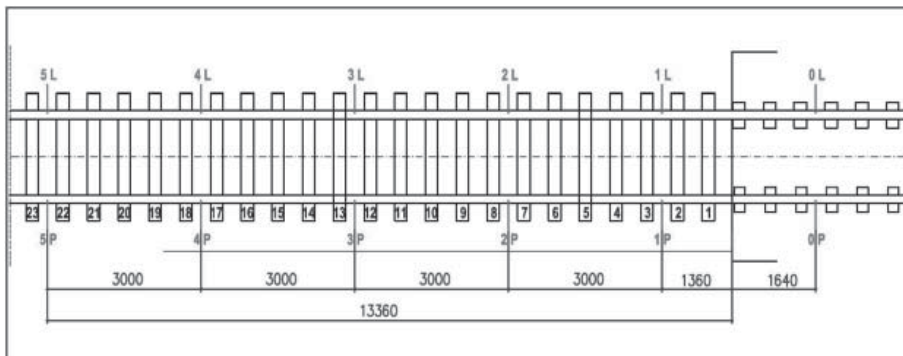
Rys. 11. Rozmieszczenie punktów pomiarowych do badania ugięć szyny (stanowisko Ruszcza)



Rys. 12. Rozmieszczenie punktów pomiarowych do badania przyspieszeń elementów nawierzchni (stanowisko Ruszcza)



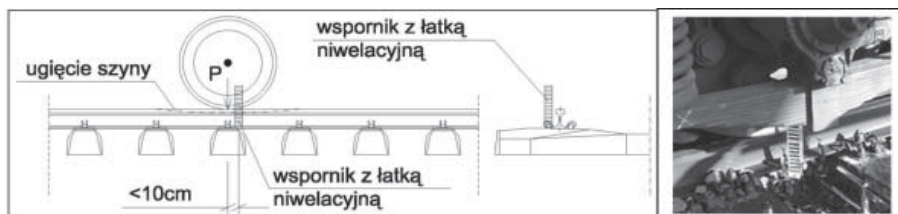
Rys. 13. Rozmieszczenie punktów pomiarowych do badania ugięć szyny oraz przyspieszeń elementów nawierzchni (stanowisko Oświęcim)



Rys. 14. Rozmieszczenie punktów pomiarowych do badania ugięć szyny (4 obiekty, Kraków) Oznaczenia punktów L/P odpowiadają lewemu i prawemu tokowi szynowemu zgodnie z kierunkiem jazdy nadanym torze. Punkty 0L/0P umieszczone są na szynach na obiekcie.

Do badań wykorzystano następujący sprzęt i metody pomiarowe:

1. **Pomiar ugięć statycznych szyn** – niwelatory precyzyjne z kompletem łątek geodezyjnych umieszczonych na szynie (rys. 14 oraz 15). W badaniach wykorzystano dwa niwelatory precyzyjne – Zeiss Ni007 oraz Trimble DiNi 0.3. Łatki pomiarowe umieszczone zostały w każdym przekroju, a odczyty wykonywane były przed i po zadanym obciążeniu z dokładnością nieprzekraczającą 0,1 mm.



Rys. 15. Zasada pomiaru statycznego ugięcia szyny

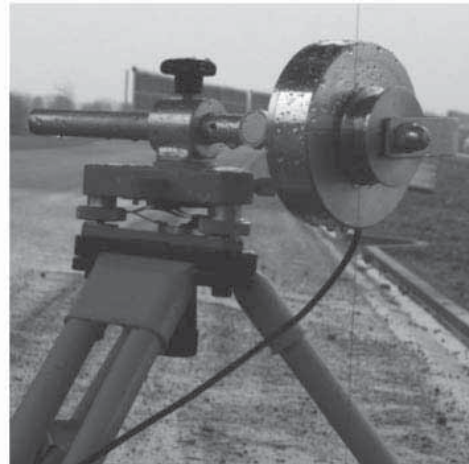
2. **Pomiar ugięć dynamicznych** – Przyrząd MSPL-01 (rys. 16 a, b) zbudowany jest z wykorzystaniem inkrementalnego enkodera optycznego i służy do pomiaru szybkozmiennych przemieszczeń. Zastosowany w przyrządzie enkoder składa się z dwóch podstawowych elementów:

- precyzyjnego pierścienia pomiarowego o średnicy zewnętrznej $\varnothing = 52$ mm z naniesioną na zewnętrznej powierzchni pierścienia strukturą prążków o szerokości $20 \mu\text{m}$;
- głowicy odczytowej przeznaczonej do rejestracji położenia prążków z pierścienia pomiarowego identyfikującej prążki w dwóch kanałach cyfrowych A i B przesuniętych fazowo o 90° .

Przemieszczenie liniowe (realizowane za pośrednictwem struny stalowej zaczepionej do badanego elementu konstrukcji oraz przewiniętej przez wałek przyrządu) jest zamieniane na ruch obrotowy pierścienia pomiarowego. Sygnały z głowicy odczytowej rejestrowane są przez mikroprocesor i przeliczane na rzeczywistą długość przemieszczenia. Rozdzielczość układu pomiarowego wynosi $5 \mu\text{m}$, przy częstotliwości rejestrowanych sygnałów na poziomie 1000 Hz.



a)



b)

Rys. 16. Przyrząd MSPL-01: a) zestaw pomiarowy, b) widok ogólny z mocowaniem na statywie

Pomiar przemieszczeń wybranego punktu konstrukcji według pierwotnych założeń, dotyczył jedynie przemieszczeń pionowych (ugięć konstrukcji) w odniesieniu do powierzchni terenu, na której ustawiany był przyrząd (rys. 17), ale istnieje również możliwość pomiaru tym przyrządem przemieszczeń poziomych punktów badanej konstrukcji.

Oprogramowanie mikroprocesora przetwarza dane pomiarowe na wyniki odczytowe według ustalonej procedury, rejestrując je w pamięci EPROM sterownika. Użytkownik zarządza pracą urządzenia za pomocą klawiszy, odczytując informacje na wyświetlaczu sterownika. Zgromadzone dane po

zakończeniu pomiaru można przekazać drogą radiową za pomocą łącza Bluetooth do komputera PC celem dalszego przetwarzania. Sterownik miernika jest wyposażony we własny bateryjny system zasilania pozwalający na ciągłą pracę urządzenia przez 8 godzin.



Rys. 17. Pomiary ugięć szyny od obciążeń dynamicznych na stanowisku badawczym - widok przyrządu zamocowanego do pręta wbitego do torowiska

3. **Pomiar przyspieszeń szyn i podkładów** - wykonano zgodnie z normą PN-85/B-02170, z wykorzystaniem czujników przyspieszeń (kierunek pionowy) 356B18 i 626A01 – częstotliwości próbkowania do 1000 Hz, przyspieszenie szyny do 50 g, przyspieszenia podkładów do 10 g (rys. 18).



Rys. 18. Pomiar przyspieszeń pionowych szyny i podkładów

7. Wyniki pomiarów statycznych i dynamicznych

7.1. Poligon badawczy – Ruzsza (tor 224)

Dane nawierzchni: szyna S60, podkłady strunobetonowe PS-83, tłuczeń stary (29.06.2010 r.) zmieszany z uzupełnionym nowym oraz jego zagęszczeniem (25.08.2010 r.).

Pomiary ugięć statycznych nawierzchni

Badania wykonano dla obydwu toków szynowych dla jednej osi lokomotywy SM-42 wraz z korektą ugięć. Wyniki podane są w tabelach 1 - 2.

Tabela 1. Zmierzone i skorygowane ugięcia szyny (odcinek Ruzsza, 29.06.2010 r.)

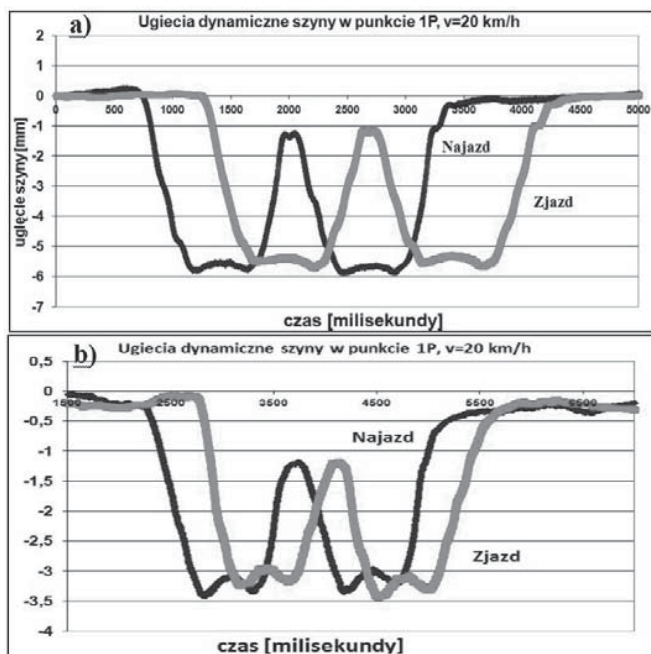
SERIA I			
punkt		szyna lewa [mm]	szyna prawa [mm]
plyta	0	1.1	1.1
strefa	1	5.7	4.7
strefa	2	3.0	3.2
strefa	3	1.7	1.7
strefa	4	1.9	1.8
strefa	5	1.8	1.9
UGIĘCIE ŚREDNIE I SKORYGOWANE			
punkt		uśrednione [mm]	skorygowane [mm]
plyta	0	1.1	1.1
strefa	1	5.2	4.6
strefa	2	3.1	2.9
strefa	3	1.7	1.7
strefa	4	1.8	1.8
strefa	5	1.8	1.8

Tabela 2. Szywności układu nawierzchnia-podłoże i współczynnik podłoża szyny (odcinek Ruzsza, seria I: 29.06.2010 r.)

Punkt pomiarowy SERIA I		Szywność [kN/mm/szyna]	Współczynnik podłoża szyny U
		- wzór (5)	[MPa/szyna]
		SERIA I	- wzór (6)
plyta	0	83.6	49.2
strefa	1	20.0	7.3
strefa	2	31.7	13.5
strefa	3	54.1	27.5
strefa	4	51.1	25.5
strefa	5	51.1	25.5

Pomiary ugięć dynamicznych nawierzchni

Przykład pomiarów dynamicznych ugięć szyny przedstawiają: rys. 19 i tab. 3.



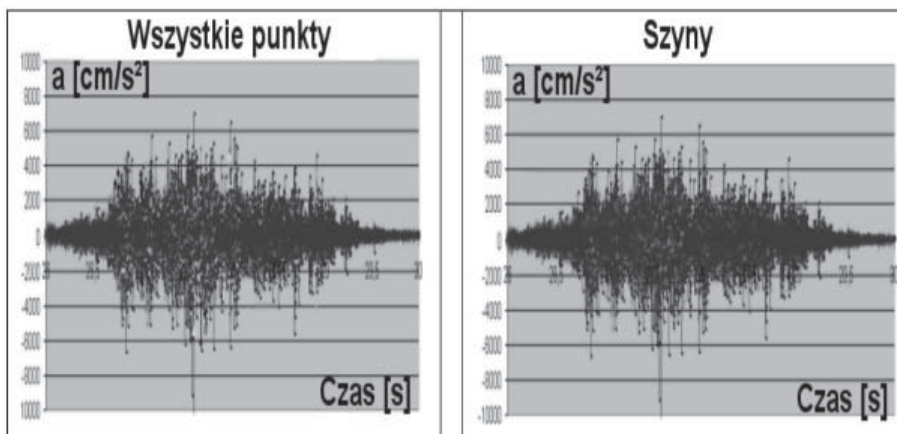
Rys. 19. Przebieg czasowy ugięć dynamicznych szyny w punkcie 1P: lokomotywa SM-42, $v=20\text{ km/h}$: a) przed uzupełnieniem tłucznia i podbiciem (29.06.2010 r.), b) po uzupełnieniu tłucznia i podbiciu (25.08.2010 r.)

Tabela 3. Amplitudy ugięć dynamicznych zmierzonych w punkcie 1P i 1L (25.08.2010 r.)

Prędkość [km/h]	Pomiary uśrednione (najjazd/zjazd) Punkt 1P	Pomiary uśrednione (najjazd/zjazd) Punkt 1L
10	2,995	2,795
20	3,315	3,215
30	3,290	3,194
40	3,155	3,425
50	3,500	3,420
60	3,960	3,663

Pomiary przyspieszeń elementów nawierzchni

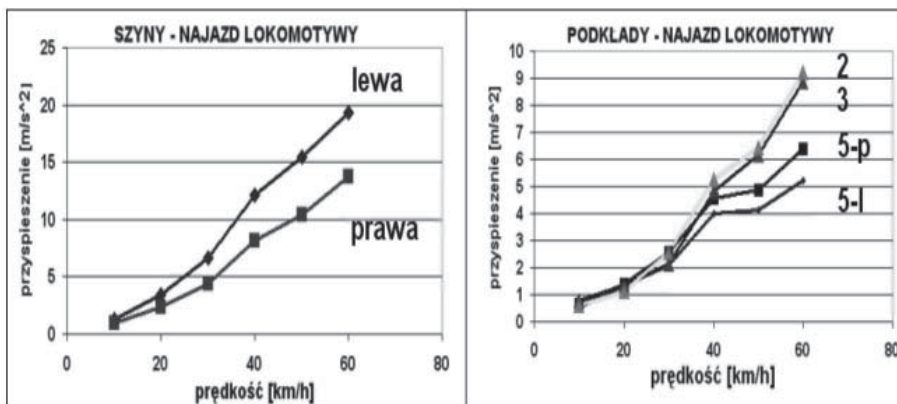
Wyniki zaprezentowano na rys. 20 - 21 (wybrane przebiegi czasowe przyspieszeń), badano także FFT elementów nawierzchni oraz obliczono wartości skuteczne przyspieszeń elementów nawierzchni.



Rys. 20. Przebiegi czasowe przyspieszeń elementów nawierzchni, najazd lokomotywy na obiekt, $v=40$ km/h

Wartości skuteczne (RMS) przyspieszeń elementów nawierzchni

Wartości skuteczne przyspieszeń wyznaczono dla najazdów i zjazdów lokomotywy (przykład rys. 21).



Rys. 21. Zależność przyspieszeń skutecznych od prędkości – przykład: najazd lokomotywy

7.2. Polygon badawczy – Most na rzece Soła (Oświęcim)

Dane nawierzchni: nawierzchnia na mostownicach typu II, długości 2.7 m, nawierzchnia poza obiektem na podkładach drewnianych typu IIB, długości 2.6 m, rozstaw podkładów na obiekcie i poza nim wynosi 60 cm, szyny: UIC 60, tłuźcen nowy zmieszany ze starym, średnio zagęszczony.

Pomiary ugięć statycznych nawierzchni

Badania wykonano dla obydwu toków szynowych dla jednej osi lokomotywy ET-22 wraz z korektą ugięć. Wyniki przedstawiają tab. 4 - 5.

Tabela 4. Zmierzone i skorygowane ugięcia szyny (odcinek Oświęcim, seria I i II: 26.11.2010 r.)

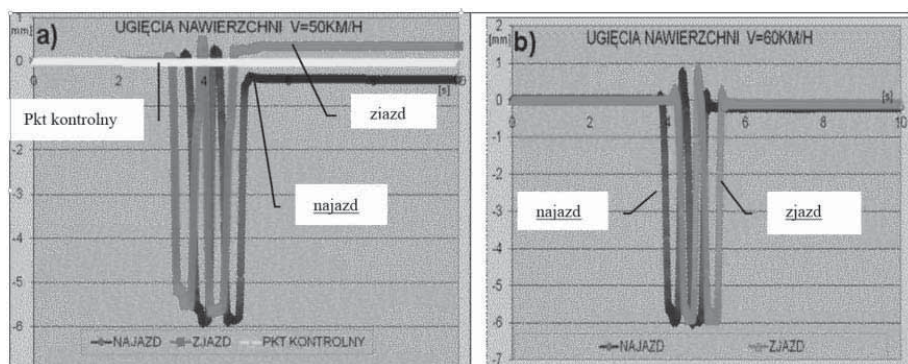
POMIAR - SERIA I					
punkt		szyna lewa [mm]		szyna prawa [mm]	
17p strefa	0	-4,6		-4,4	
10p strefa	1	-7,2		-5,3	
3p strefa	2	-5,3		-6,4	
3p most	3	-3,5		-4,3	
POMIAR - SERIA II					
punkt		szyna lewa [mm]		szyna prawa [mm]	
17p strefa	0	-4,6		-5,9	
10p strefa	1	-7,2		-5,5	
3p strefa	2	-4,4		-6,4	
3p most	3	-3,5		-2,0	
UGIĘCIE ŚREDNIE I SKORYGOWANE					
punkt		szyna lewa [mm]	szyna prawa [mm]	uśrednione [mm]	skorygowane [mm]
17p strefa	0	-4,60	-5,15	-4,88	-3,6
10p strefa	1	-7,20	-5,40	-6,30	-4,1
3p strefa	2	-4,85	-6,40	-5,63	-4,0
3p most	3	-3,50	-3,15	-3,33	-2,7

Tabela 5. Sztywność układu oraz współczynnik podłoża szyny (odcinek Oświęcim, 26.11.2010 r.)

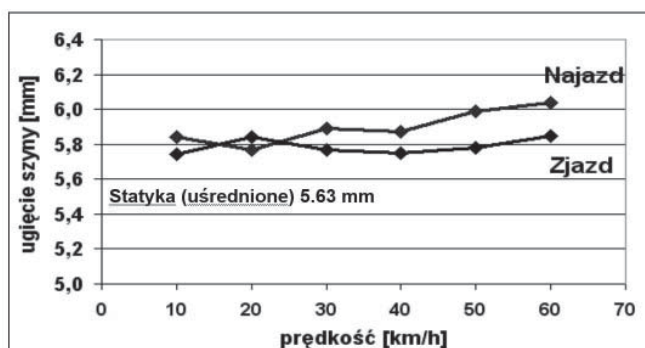
punkt		Sztywność całkowita k[kN/mm/koło] wzór (5)	WSPÓLCZYNNIK PODŁOŻA U [MPa/szyna] wzór (6)
17p strefa	0	27.4	11.5
10p strefa	1	24.7	9.7
3p strefa	2	25.2	9.9
3p most	3	33.9	16.6

Pomiary ugięć dynamicznych nawierzchni

Ugięcia dynamiczne zostały zmierzone dla prędkości 10 ÷ 60 km/h w dwóch kierunkach: przy najeździe na obiekt oraz przy zjeździe z obiektu. W każdym przypadku wyznaczona została amplituda ugięcia dynamicznego. Dla celów kontroli wykonano pomiar ugięcia ścianki żwirowej obiektu. Założono, że ścianka żwirowa jest nieruchoma podczas przejazdu lokomotywy. Pomiary wykazały, że ugięcia ścianki były mniejsze niż 0.02 mm, co oznacza, że błąd pomiaru jest bardzo mały i nie rzutuje na wyniki (rys. 22 - 23).



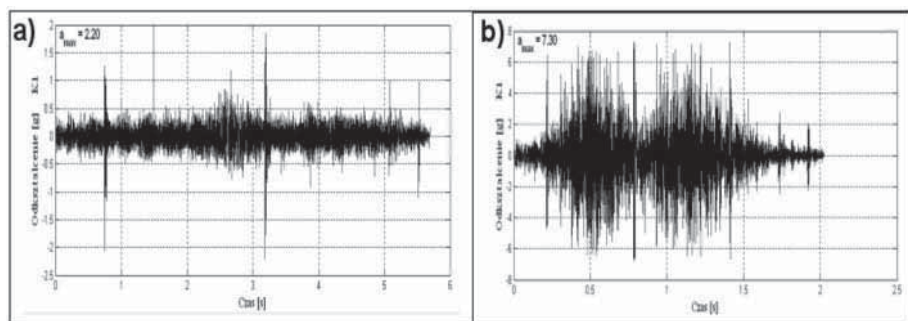
Rys. 22. Wyniki pomiarów ugięć dynamicznych szyny: a) $v=50$ km/h, b) $v=60$ km/h. Punkt PKT 2 (26.11.2010 r.)



Rys. 23. Zależność amplitudy ugięć szyny od prędkości lokomotywy ET-22 (PKT 2)

Pomiary przyspieszeń elementów nawierzchni

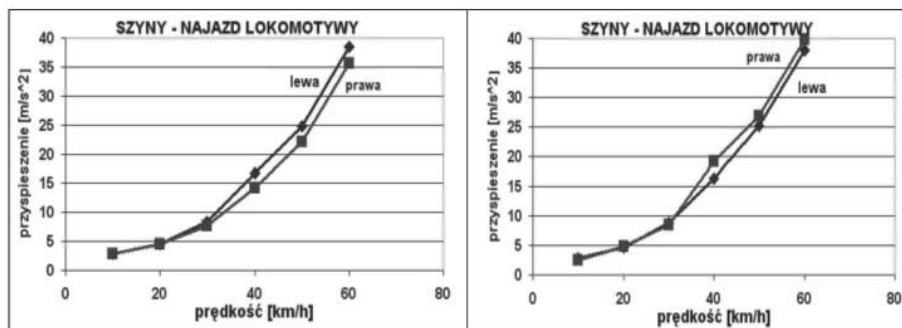
Wyniki zaprezentowano na rys. 24 - 25 – wybrane przebiegi czasowe przyspieszeń i widmo tercjowe przyspieszeń.



Rys. 24. Przebiegi czasowe przyspieszeń szyn: a) $v=10$ km/h, b) $v=60$ km/h – najazd (PKT 2), wartości maksymalne przyspieszeń to odpowiednio 2.2g oraz 7.3g

Wartości skuteczne (RMS) przyspieszeń szyn nawierzchni

Zostały one wyznaczone dla najazdów i zjazdów lokomotywy (prędkość do 60 km/h). Wyniki ilustruje rys. 25.



Rys. 25. Zależność przyspieszeń skutecznych szyn od prędkości – najazd i zjazd lokomotywy (PKT 2)

7.3. Polygon badawczy – Kraków (linia nr 100, tor 2) – łącznie 4 obiekty

Na odcinku badawczym w Krakowie znajdują się 4 obiekty mostowe: jeden z korytem balastowym oraz trzy z nawierzchnią na mostownicach. Tuż przed wykonywaniem pomiarów (11-12.09.2012 r.) zakończony został remont obiektów wraz z przebudową stref przejściowych w podtorzu. Wymieniono także nawierzchnię na obiektach oraz w obrębie stref przejściowych. W ten sposób stworzone zostały warunki do uchwycenia parametrów „startowych” nawierzchni i podtorza. Poniżej (tab. 7.6 – 7.7 oraz rys. 7.8) pokazano jedynie mały wycinek pomiarów, które, w zamierzeniu Autorów, mają być kontynuowane regularnie wraz z dopracowywaniem metodyki pomiarowej.

Tabela 6. Zmierzone i skorygowane ugięcia szyny (odcinek Kraków, 11-12.09.2012 r.)

POMIAR – OBIEKT 1 (Z KORYTEM BALASTOWYM, STRONA PÓŁNOCNA)				
punkt		szyna lewa [mm]		szyna prawa [mm]
Obiekt – 2m	0	1,80		1,00
Strefa – 1m	1	1,45		0,80
Strefa – 4m	2	1,25		1,05
Strefa – 7m	3	1,30		0,95
Strefa – 10m	4	1,80		1,74
Strefa – 13m	5	1,75		1,45
SKORYGOWANE WARTOŚCI UGIĘĆ				
punkt		szyna lewa [mm]	szyna prawa [mm]	uśrednione [mm]
Obiekt – 2m	0	1,75	1,00	1,38
Strefa – 1m	1	1,41	0,80	1,11
Strefa – 4m	2	1,22	1,05	1,14
Strefa – 7m	3	1,26	0,95	1,11
Strefa – 10m	4	1,75	1,70	1,73
Strefa – 13m	5	1,71	1,41	1,56

Tabela 7. Sztywność układu oraz współczynnik podłoża szyny, Kraków, obiekt nr 1, strona północna (11-12.09.2012 r.)

punkt		Sztywność całkowita k[kN/mm/koło] wzór (5)	WSPÓLCZYNNIK PODŁOŻA U [MPa/szyna] wzór (6)
Obiekt – 2m	0	72,7	40,8
Strefa – 1m	1	90,5	54,6
Strefa – 4m	2	88,1	52,7
Strefa – 7m	3	90,5	54,6
Strefa – 10m	4	58,0	30,2
Strefa – 13m	5	64,1	34,5



Rys. 26. Pomiar na obiekcie nr 1, Kraków, strona północna

8. Przykładowe obliczenia niejednorodności układu nawierzchnia-podłoże

W tabeli 8 podano przykładowe obliczenia różnicy sztywności układu nawierzchnia-podtorze w stosunku sztywności układu nawierzchnia-obiekt oraz ugięć zmierzonych na obiektach.

Tabela 8. Różnice sztywności układu nawierzchnia-podłoże (wzór 10)

punkt		RÓŻNICE SZTYWNOŚCI [%] NA ODCINKACH BADAWCZYCH		
		RUSZCZA (29.06.2010)	OŚWIĘCIM	KRAKÓW – OBIEKT 1
obiekt	0	318	35	-20
strefa	1	-37	2	3
strefa	2	-41	-10	-3
strefa	3	6	-	56
strefa	4	0	-	-10
strefa	5	-	-	-

Obliczenia różnicy ugięć dynamicznych można wykonać w analogiczny sposób. Jednakże praktyczne wykonanie pomiarów dynamicznych jest trudniejsze z uwagi na konieczność dysponowania odpowiednią liczbą czujników ugięć. Z porównania ugięć statycznych oraz ugięć dynamicznych wynika, że w przypadku stosunkowo małych prędkości nie różnią się one znacząco. Do obliczeń sztywności można wykorzystać wyniki ugięć statycznych.

9. Podsumowanie

Z uwagi na bardzo szeroki zakres prowadzonych badań, w referacie przedstawiono jedynie zarys metodyki oceny stref przejściowych w z punktu widzenia ugięć szyny oraz sztywności całkowitej układu szyna-podłoże (obiekt lub podtorze).

Po wykonaniu testów urządzeń, sposobów ich instalacji oraz po wypracowaniu metodyki prowadzenia pomiarów z punktu widzenia ich organizacji (przydział zadań dla osób odpowiedzialnych za poszczególne pomiary, uzyskiwania zamknięć torów, wynajmu lokomotyw do jazd testowych, itd.) można na obecnym etapie stwierdzić:

- wypracowano optymalne rozmieszczenie punktów pomiarowych na szynach (choć do celów diagnostycznych wydaje się pożądane zmniejszenie ich liczby),
- maksymalnie skrócono czas wykonywania pomiarów (do około 30 minut na jednej strefie przejściowej),
- porównano wyniki pomiarów ugięć statycznych i dynamicznych, stwierdzając dobrą zgodność dla małych prędkości,
- określono zależność ugięć dynamicznych od prędkości (w badanym zakresie prędkości),
- stwierdzono, że sposób mocowania czujnika do pomiarów ugięć dynamicznych szyny wymaga dopracowania, gdyż w niektórych przypadkach pojawia się niestabilność (stwierdzona np. poprzez pomiar ugięć punktów kontrolnych na ścianie żwirowej – w artykule zaprezentowano wyniki poprawne, pomiar kontrolny wykazał zerowe ugięcia),
- istnieje potrzeba zastosowania większej liczby czujników do pomiaru ugięć dynamicznych szyny,
- istnieje potrzeba wykonywania pomiarów także bez zamknięcia toru – w takim przypadku będą jedynie mierzone ugięcia dynamiczne szyny oraz przyspieszenia szyn, miarami niejednorodności układu nawierzchnia-podłoże będą wtedy ugięcia dynamiczne (wzór 11) oraz przyspieszenia skuteczne szyn (w tym przypadku sposób oceny sztywności układu nawierzchnia-podłoże wymaga jeszcze wypracowania),
- ciekawy przypadek odnotowano na obiekcie z korytem balastowym w Krakowie: sztywność układu nawierzchnia-podtorze w strefie przejściowej jest większa niż na obiekcie (tabela 25), jest to stan początkowy po podbiciu i po

ustabilizowaniu – w dużej mierze przeczy on opiniom, że sztywność w strefie przejściowej jest mniejsza (nota bene z drugiej strony obiektu zaobserwowano podobną sytuację). Ponadto zwykle uważa się, że różnica sztywności jest przyczyną dodatkowych oddziaływań dynamicznych w strefie przejściowej, które prowadzą do pojawienia się nierówności geometrycznych. W tym przypadku nie będzie takich oddziaływań. Zatem efekt progowy, który z pewnością wystąpi w dalszym etapie eksploatacji, nie będzie zainicjowany przez różnicę sztywności (jest to spostrzeżenie zgodne z wcześniej wyrażonymi poglądami – por. np. [15, 20]). Autorzy zamierzają wykonywać systematyczne badania na tym i innych obiektach w celu opisu ewolucji efektu progowego.

Literatura

- [1] Bachmann K., State-of-the-art.: ballastless track systems. RTR Special – Slab Track, 2006.
- [2] Bałuch H., Sposoby wyznaczania charakterystyk podłoża kolejowego. *Problemy Kol.*, z. 39, 1967, 119-136.
- [3] Berggren E., Railway Track Stiffness - Dynamic Measurements and Evaluation for Efficient Maintenance. Royal Institute of Technology (KTH), Aeronautical and Vehicle Engineering, Stockholm, 2009.
- [4] Czyczyła W., Kudła D., Lisowski S., Budowa bezpodsypankowej nawierzchni typu RHEDA 2000 na wiaduktach kolejowych linii Kraków-Medyka. *Zeszyty Naukowo-Techniczne SITK RP*, Kraków, 2003, 91-100.
- [5] Davis D., Plotkin D., Track settlement at bridge approaches: what causes track settlement at bridge approaches and how can railroad engineering departments deal with the problem safely and efficiently. *Railway Track and Structures*, Feb. 1, 2009.
- [6] Drożdżel J., Sowinski B., Szulczyk A., Equivalent track stiffness determination. *Machines, Technologies, Materials, International Virtual Journal*, no. 4, 2011, str. 12-14.
- [7] ERRI D 230.1/RP 3, Bridge Ends. Embankment Structure Transition, State of the Art Report, Utrecht, November 1999 (współautorzy: Kłosiński B., Niemierko A.).
- [8] Esveld C., Track Stiffness Measurements Using an Adapted Tamping Machine. *Rail International*, February 1980.
- [9] FRA report RR04-03, A Preliminary Design of a System to Measure Vertical Track Modulus from a Moving Railcar, January 2004, <http://www.fra.dot.gov/downloads/-Research/-rr0403.pdf>.
- [10] Groll W., Gąsiński T., Szolc T., Doświadczalne badanie własności dynamicznych i statycznych toru kolejowego w warunkach Polskich Kolei Państwowych. *Pojazdy Szynowe*, 2002, nr 3, s. 46-52.

- [11] Hosseingholian M., Continuous dynamic measurement technique of railway track stiffness. Caen University, France 2007.
- [12] Hunt G.A. "Review of the Effect of Track Stiffness on Track Performance" RSSB, Research Project T372, February 2005.
- [13] Kerr A. D., On the determination of the rail support modulus k . International Journal of Solids and Structures 37 (2000) 4335-4351.
- [14] Li D., Thompson R., Kalay S., Development of Continuous Lateral and Vertical Track Stiffness Measurement Techniques, Proceedings Railway Engineering, London 2002.
- [15] Plotkin D., Bridge Approaches and Track Stiffness. U.S. Department Of Transportation Federal Railroad Administration, Research Results 07-12, April 2007.
- [16] Popp K., Schiehen W., System dynamics and long-term behaviour of railway vehicles, track and subgrade. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2003.
- [17] Rasmussen S., Man A. P., The High Speed Deflectograph and the Hammer Excitation Test: Two Measurement Techniques for Determining Track Performance. Rail Engineering International, Edition 2000 Number 1.
- [18] Rozporządzenie MTiGM w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budowle kolejowe i ich usytuowanie (Dz. U. Nr 151, poz. 987), 1998.
- [19] Sasaoka D., Track transition designs for heavy-axle-load service: analyses of track transition issues at bridge approaches, road crossings and special track work find ways to minimize track stiffness and maximize maintenance dollars (TTCI R&D). Railway Track and Structures, April 1, 2006.
- [20] Solkowski J., Stiffness of the beam-foundation system under a moving load - a bi-linear model. International Simulation Multiconference, Den Hague, The Netherlands, 27-30 June, 2011.
- [21] Sussmann T.R., Track Geometry and Deflection from Unsprung Mass Acceleration Data. Proceedings from Railway Engineering Conference, London 2007.
- [22] UIC, Project I/03/U/283 - Ballastless Track, Draft – Vertical Elasticity of Ballastless Track, Version 2005-08-02.
- [23] US Department of Transportation (Shane Farritor) "Real-time measurement of track modulus from a moving car" DOT/FRA/ORD-05/2005
- [24] Vymetal A., Turek J., Continuous Measurement of Track Stiffness Using a Rolling Load. Proceedings from the RTSA CORE conference on Railway Engineering, Wollongong, Australia 10 – 13 November 2002.
- [25] Wangqing Z., Geming Z., Kaiming L., Development of Inspection Car for Measuring Railway Track Elasticity. Proceedings from 6th International Heavy Haul Conference, Cape Town 1997.
- [26] ZG Optique homepage 2009: <http://www.zgoptique.ch/>.