

BADANIA NAUKOWE W INSTYTUCIE DRÓG I MOSTÓW

SCIENTIFIC RESEARCH OF THE
INSTITUTE OF ROADS AND BRIDGES

Praca zbiorowa pod redakcją
Piotra Olszewskiego

Wydział Inżynierii Lądowej
Politechniki Warszawskiej



Monografia jubileuszowa
Instytutu Dróg i Mostów

ISBN 978-83-8156-018-4

Warszawa 2019
Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej

WIBROIZOLATORY W KONSTRUKCJI NAWIERZCHNI DRÓG SZYNOWYCH – BADANIA LABORATORYJNE I SYMULACJE KOMPUTEROWE

*Artur ZBICIAK, Henryk ZOBEL, Wojciech OLEKSIEWICZ,
Cezary KRAŚKIEWICZ, Cezary LIPKO, Anna AL SABOUNI-ZAWADZKA*

1. Wstęp

Izolatory wibroakustyczne są to elementy sprężyste stosowane w konstrukcji dróg szynowych głównie w celu redukcji niekorzystnych oddziaływań w postaci wibracji i hałasu, generowanych przez ruch pojazdów szynowych po torze. Do elementów tych należą pojedyncze wyroby lub ich zespoły, różniące się materiałem i położeniem w systemie konstrukcyjnym dróg szynowych oraz pełniące różne funkcje – tłumienie drgań materiałowych pionowych i poprzecznych (wibracji) lub dźwięków powietrznych (hałasu). Stosowane w praktyce rozwiązania konstrukcyjne dróg szynowych obejmują rozmaite elementy spełniające funkcje izolatorów wibroakustycznych i jednocześnie funkcje mechaniczne, zapewniające bezpieczną i trwałą eksploatację dróg szynowych.

Izolatory wibroakustyczne mogą występować w konstrukcji dróg szynowych w różnych strefach, stanowiąc następujące elementy składowe tych konstrukcji [1]:

- sprężyste mocowanie w systemie przytwierdzenia stopki szyny,
- sprężyste podparcie w systemie przytwierdzenia stopki szyny (np. przekładka podszynowa),
- sprężyste mocowanie do podpory szynowej lub podbudowy węzła kotwiącego,
- sprężyste podparcie na podporze szynowej lub podbudowie węzła kotwiącego,
- sprężyste podparcie i mocowanie podpory szynowej (np. podkładka podpodkładowa – USP),
- sprężyste podparcie i mocowanie nawierzchni torowej (np. mata wibroizolacyjna podtłuczniowa lub podpłytkowa – UBM),
- zabudowa komór łukowych szyn.

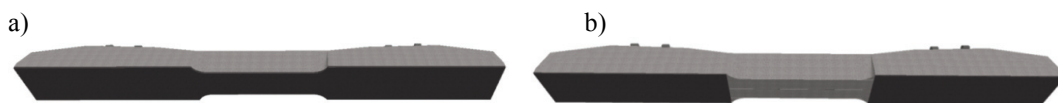
W dalszej części artykułu skupiono się na wdrażanych w ostatnich latach również w Polsce podkładkach podpodkładowych, czyli wyrobach stanowiących sprężyste podparcie podpory szynowej w postaci podkładu belkowego w nawierzchni kolejowej o konstrukcji podsypkowej.

Podkładki podpodkładowe [2, 3], określane dalej skrótowo jako „podkładki USP” (od ang. *under sleeper pads*), stosowane są przede wszystkim w nawierzchni kolejowej o konstrukcji podsypkowej w celu zmniejszenia dynamicznych oddziaływań od ruchu pojazdów szynowych, przekazywanych od kół pojazdów poprzez szyny, złączki i podpory szynowe (w nawierzchni podsypkowej zwykle w postaci podkładów betonowych, a w rozjazdach w postaci podrozjazdnic) na warstwę podsypki tłuczniowej.

W nawierzchni kolejowej o konstrukcji podsypkowej podkładki USP powinny spełniać następujące funkcje:

- ograniczać niekorzystny wpływ ruchu kolejowego na środowisko poprzez zmniejszenie poziomu oddziaływań takich jak drgania materiałowe i akustyczne (wibracje i hałas wtórny);
- redukować naprężenia występujące w warstwie podsypki poprzez zwiększenie powierzchni kontaktu pomiędzy spodem podkładu i podsypką, zwiększając w ten sposób trwałość eksploatacyjną konstrukcji nawierzchni.

Podkładki USP mogą pokrywać w całości powierzchnię dolną podkładu/podrozjazdnicy (rys. 1.1a) lub występować tylko w strefie aktywnego przekazywania nacisków pionowych (rys. 2.1b). Stosowane dalej określenie „podkład” jest rozumiane umownie jako podkład betonowy lub również jako podrozjazdnica betonowa, przy czym określenie „betonowy” ma tu upraszczające, ogólne znaczenie obejmujące wszystkie rodzaje stosowanych technologii sprężania betonu w tak rozumianych podkładach (np. strunobeton, kablobeton itp.).



Rysunek 1.1. Podkładka USP: a) całkowite pokrycie powierzchni dolnej podkładu, b) częściowe pokrycie powierzchni dolnej podkładu

Wiele oferowanych wariantów grubości oraz sztywności podkładek USP pozwala je stosować w szerokim zakresie obciążeń i prędkości pojazdów szynowych przy różnych rozwiązaniach nawierzchni o konstrukcji podsypkowej. Kryteriami wyboru konkretnej odmiany podkładek podpodkładowych jest dopuszczalna wartość ugięcia szyny i częstotliwość drgań własnych obiektów, które należy chronić przed destrukcyjnym wpływem wibracji od przejazdu pociągów.

Podkładki USP są produkowane z materiałów elastomerowych (najczęściej w zakresie grubości 5–20 mm) i występują w dwóch odmianach materiałowych [1]:

- I. podkładki na bazie poliuretanu w odmianach z porami zamkniętymi lub otwartymi,
- II. podkładki na bazie gumy (kompozytowe na bazie mieszanek kauczuku naturalnego lub/i kauczuku syntetycznego), których sprężystość zapewniona jest przez kształt i strukturę przekroju podkładki (gęstość i objętość porów).

Podkładki USP są mocowane do spodu podkładów, przy czym może to odbywać się na dwa sposoby:

- w trakcie procesu produkcji podkładów, poprzez umieszczenie na dolnej ich powierzchni niestwardniałego jeszcze betonu podkładki USP, a następnie poddaniu podkładu krótkim wibracjom, co spowoduje wniknięcie warstwy szczepnej podkładki (np. geosyntetyku) w plastyczny jeszcze beton;
- na gotowym podkładzie poprzez przyklejenie podkładki USP szybkotwardniejącym i wiążącym klejem (np. epoksydowym) – przyklejanie podkładek USP do spodu podkładów może odbywać się w ciągu procesu produkcyjnego podkładów lub już po ich wyprodukowaniu, ale dopiero po ich przetransportowaniu na miejsce budowy, co stanowi dodatkową ochronę podkładek przed ich ewentualnymi mechanicznymi uszkodzeniami powstałymi w czasie transportu i przeładunku.

2. Badania laboratoryjne podkładek USP

2.1. Statyczny i dynamiczny moduł sztywności

Podstawowymi parametrami charakteryzującymi sprężyste właściwości podkładek USP, ocenianych z uwagi na ich główne funkcje opisane powyżej, są statyczne i dynamiczne moduły sztywności [4]. Wpływają one na skuteczność tłumienia transmisji wibracji do otoczenia linii kolejowych. W przypadku podkładek USP o większej wartości modułów sztywności skuteczność ta będzie mniejsza niż w podkładkach o mniejszych wartościach modułów sztywności. Jednak trzeba mieć na uwadze, że zastosowanie podkładki USP o bardzo małej wartości statycznego modułu sztywności, skutkuje większym ugięciem pionowym szyny wywołującym zjawiska zmęczeniowe w szynie i w innych elementach składowych konstrukcji nawierzchni kolejowej. Wartości statycznego i dynamicznego modułu sztywności podkładki USP mogą zawierać się w szerokim przedziale wartości. W przypadku statycznego modułu sztywności wynosi ona zwykle od $\sim 0,02 \text{ N/mm}^3$ do $\sim 0,45 \text{ N/mm}^3$ i zależy od m.in. rodzaju i struktury materiału, grubości podkładki, wartości przedziału obciążenia, w jakim określany jest moduł sztywności oraz częstotliwości obciążeń w przypadku modułu dynamicznego.

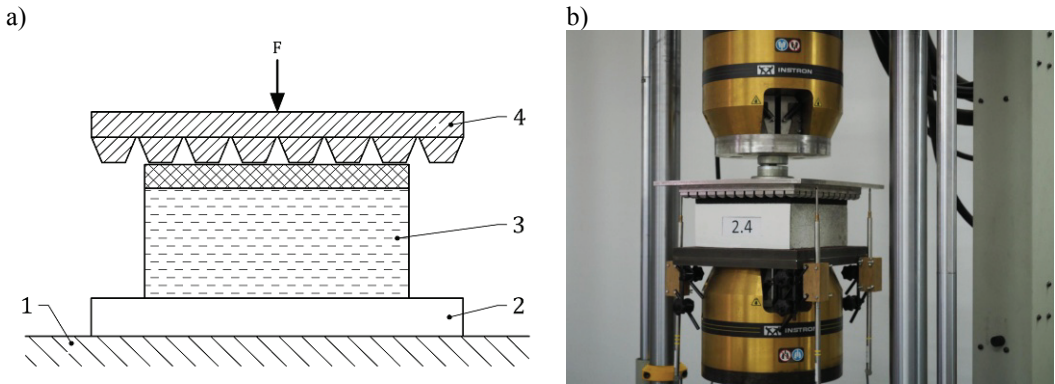
Statyczne moduły sztywności podkładki USP C_{stat} , C_{tend} [N/mm^3] są stosunkiem statycznego nacisku/naprężenia o określonej wartości, przyłożonego do próbki o określonej powierzchni przekroju, do ugięcia próbki, które ten nacisk powoduje. Charakteryzują one ugięcie toku szynowego pod naciskiem nieporuszającego się taboru i mają wpływ na ugięcie pionowe rusztu torowego. Wartość statycznego modułu sztywności podkładki USP jest zależna od nacisku, nie jest to jednak zależność liniowa. Dlatego też jest określana przy różnych zakresach obciążeń w zależności od rozpatrywanego przeznaczenia zastosowania podkładki: tramwaj, metro, kolej miejska czy kolej ciężka. Zakresy te, w zależności od parametrów eksploatacyjnych (maksymalna prędkość i naciski osiowe), są określone w normie PN-EN 16730 [5] dla czterech kategorii toru: TC1, TC2, TC3 i TC4 (TC – skrót od ang. *Track Category*) zdefiniowanych w tej normie.

Dynamiczny moduł sztywności podkładki USP C_{dyn} [N/mm^3] jest stosunkiem dynamicznego nacisku o określonej wartości i częstotliwości, przyłożonego do próbki o określonym polu przekroju, do ugięcia próbki, które ten nacisk powoduje. Charakteryzuje on zatem pracę podkładki USP pod naciskiem poruszającego się taboru. Wartość dynamicznego modułu sztywności podkładki jest zależna nie tylko od nacisku, jak w przypadku statycznego modułu sztywności, ale również od częstotliwości cyklicznych obciążeń, dlatego też powinna być wyznaczana w warunkach znormalizowanego nacisku i częstotliwości podanych w normie PN-EN 16730 [5].

Do badania statycznego i dynamicznego modułu sztywności używane są trzy próbki o wymiarach $250\text{ mm} \times 250\text{ mm} \times$ grubość podkładki lub $250\text{ mm} \times 250\text{ mm} \times$ (grubość próbki podkładki przyklejonej do betonowej kostki). W badaniu wykorzystuje się znormalizowaną, profilowaną symetrycznie płytę dociskową/obciążeniową GBP (skrót od ang. *geometric ballast plate*), pokazaną na rys. 2.1. Obciążenie próbki odbywa się w sposób pokazany na rys. 2.2. Bazując na zmierzonych ugięciach, statyczny moduł sztywności podkładki powinien zostać obliczony w N/mm^3 dla piątego cyklu obciążenia jako moduł sieczny pomiędzy skrajnymi wartościami zakresu obciążeń, które podlegają ocenie.



Rysunek 2.1. Profilowana symetrycznie płyta dociskowa/obciążeniowa GBP



Rysunek 2.2. Badanie statycznego i dynamicznego modułu sztywności podkładki USP: a) schemat badania (1 – sztywne i nieodkształcalne podłoże/odparcie, 2 – stalowa płyta, 3 – podkładka USP zamocowana do kostki betonowej, 4 – profilowana płyta dociskowa/obciążeniowa GBP), b) próbka prototypowego materiału nr 003 na stanowisku badawczym

2.2. Trwałość eksploatacyjna

Trwałość (zdatność) eksploatacyjną podkładek USP ocenia się poprzez badanie ich mechanicznej wytrzymałości zmęczeniowej i wpływu długotrwałych obciążeń dynamicznych na zmienność ustalonych parametrów w odniesieniu do wartości zidentyfikowanej na początku badań. Badanie to polega na trzystopniowym obciążeniu dynamicznym próbki podkładki USP przyklejonej do kostki betonowej, symulującym w warunkach laboratoryjnych obciążenia eksploatacyjne. Obciążenia dynamiczne wywierane przez pulsator są sinusoidalnie zmienne z częstotliwością do 15 Hz i wywierane z siłą harmoniczną o wartościach z przedziału od 12 kN do 32 kN zależnych od:

- przedziału wartości statycznego modułu sztywności badanej podkładki – wartości siły są przyjmowane narastająco w zależności od wartości statycznego modułu sztywności badanej podkładki;
- kategorii toru TC – wartości siły przyjmowane narastająco w zależności od nacisku osi i prędkości przypisanych w normie [5] do poszczególnych kategorii toru;
- I, II lub III stopnia obciążenia (I – 2000 cykli; II – 2000 cykli; III – aż do łącznej liczby 3 mln cykli).

Pozytywna ocena zdatności eksploatacyjnej badanej podkładki USP obejmuje stwierdzenie braku określanych wizualnie uszkodzeń mechanicznych podkładki, takich jak np. jej zgniecenie, pęknięcia, rozerwania itp., a także określenie zakresu zmiany wartości statycznego i dynamicznego (dla 5 Hz) modułu sztywności podkładki wywołanej długotrwałym obciążeniem dynamicznym. Mając na uwadze nawierzchnię o konstrukcji podsypkowej, wymiana podkładki USP o zbyt małej trwałości wiązałaby się z naprawą główną nawierzchni (wymianą rusztu torowego). Dlatego tak istotna jest ta właściwość dla Zarządców

infrastruktury, którzy nie mogą sobie pozwolić na to, aby trwałość podkładki USP odbiegała od trwałości podkładu lub podrozdżadnicy.

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań wytrzymałości zmęczeniowej dla podkładki USP na bazie granulatu gumowego SBR o gr. 7 mm, oznaczonej dalej jako podkładka nr 003.

Badane próbki miały wymiary 250 mm × 250 mm × grubość USP i były przyklejone do betonowych kostek o wymiarach 250 mm × 250 mm × 100 mm. Testy przeprowadzono w temperaturze pokojowej z zastosowaniem płyty GBP. Dla każdej próbki wyznaczono trzy parametry dla kategorii toru TC3: C_{stat} – statyczny moduł sztywności dla przeważającego w eksploatacji zakresu obciążenia (0,01÷0,1) N/mm², C_{tend} – statyczny moduł sztywności dla zakresu obciążenia (0,01÷0,2) N/mm² oraz C_{dyn05} – dynamiczny moduł sztywności dla częstotliwości obciążenia 5 Hz. Badania wykonywane były do 500 tys. cykli (wartość mniejsza niż normowe 3 mln cykli), co jest uzasadnione wstępnym charakterem badania i wystarczające do preselekcji podkładek USP do dalszych analiz.

Wartości statycznych i dynamicznych modułów sztywności otrzymane w badaniu wytrzymałości zmęczeniowej prototypowego materiału nr 003 przedstawiono w tab. 2.1. Zmiany wartości analizowanych modułów pomiędzy wartościami przed („be”) i po („af”) badaniem wyznaczono ze wzoru [5]:

$$\Delta C_i = \frac{C_{i,af} - C_{i,be}}{C_{i,be}} \cdot 100 [\%], \quad (2.1)$$

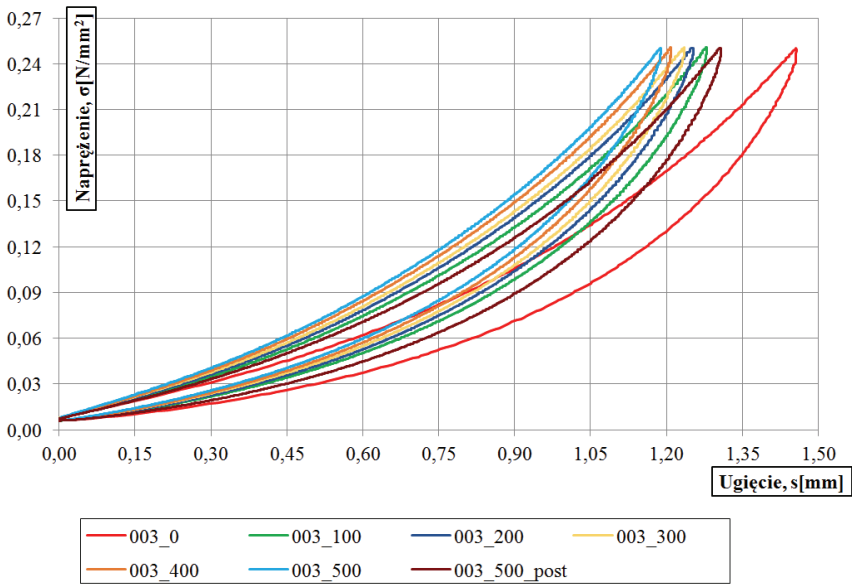
gdzie: $i = \{\text{stat; tend; dyn05}\}$, C – moduł sztywności.

Tablica 2.1. Wartości statycznych i dynamicznych modułów sztywności otrzymane w badaniu wytrzymałości zmęczeniowej prototypowego materiału nr 003

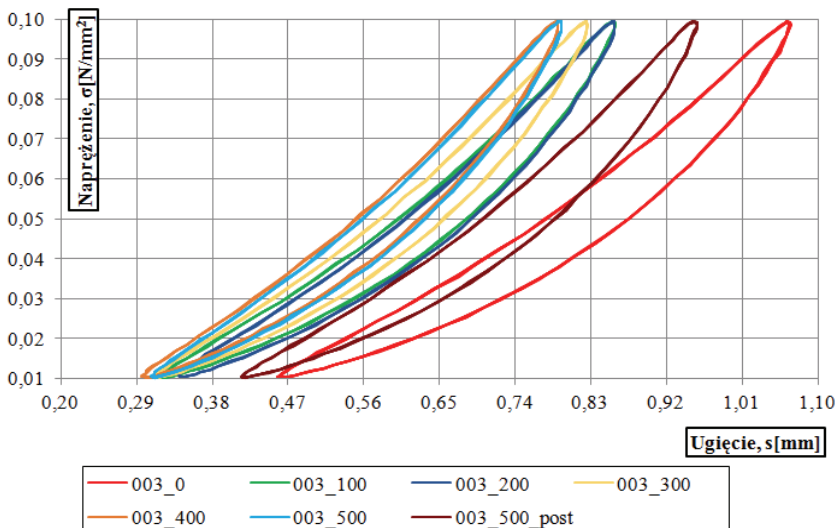
Parametr	Moduł sztywności [N/mm ³]							ΣΔ [%]
	003_0	003_100	003_200	003_300	003_400	003_500	003_500_post	
C_{stat} (0,01–0,10)	0,108	0,127	0,131	0,133	0,138	0,140	0,122	13,9
C_{tend} (0,01–0,20)	0,149	0,171	0,175	0,177	0,182	0,184	0,167	13,4
C_{dyn05}	0,149	0,167	0,173	0,176	0,183	0,185	0,167	17,4

Na rys. 2.3–2.4 przedstawiono wykresy charakterystyk statycznych i dynamicznych (pętle histerezy) otrzymanych w testach zmęczeniowych podkładek USP. Uwzględniono wartości początkowe (przed badaniem zmęczeniowym) oznaczone cyfrą „0”, wartości po 100, 200, 300, 400 i 500 tys. cykli obciążenia oraz wartości wyznaczone po okresie od jednego do dwóch tygodni po zakończeniu testów zmęczeniowych, oznaczone symbolem „post”.

Analiza wyników przedstawionych w tab. 2.1 oraz na rys. 2.3–2.4 wskazuje, że badany prototypowy materiał nr 003 wykazuje korzystne właściwości z punktu widzenia trwałości zmęczeniowej. Zmiany sztywności są nieduże ($< 20\%$), a krzywe sztywności po okresie od jednego do dwóch tygodni po zakończeniu testów zmęczeniowych leżą stosunkowo blisko krzywych początkowych. Zmiany sztywności mieszczą się zatem w przyjmowanych w literaturze dopuszczalnych wartościach dla wyrobów sprężystych stosowanych w nawierzchni kolejowej (wartość graniczna jest przyjmowana przeważnie jako 15–25% [6, 7, 8]).



Rysunek 2.3. Statyczny moduł sztywności w badaniu wytrzymałości zmęczeniowej



Rysunek 2.4. Dynamiczny moduł sztywności (5 Hz) w badaniu wytrzymałości zmęczeniowej

2.3. Odporność na warunki atmosferyczne

Ze względu na występowanie wód opadowych w podsypce i znaczą różnicę temperatur występującą w naszej strefie klimatycznej, badanie podkładek USP pod kątem ich odporności na działanie wody, mrozoodporności i wysokich temperatur jest jak najbardziej uzasadnione. Utrzymująca się przez co najmniej dwa tygodnie w okresie zimowym temperatura poniżej -15°C i jej oscylowanie w okolicy 0°C nie w Polsce rzadkością.

W badaniu odporności na warunki atmosferyczne, próbka podkładki USP przyklejona do betonowej kostki jest przechowywana w wodzie przez 24 h, a następnie cyklicznie zamrażana do temperatury -15°C w czasie 4 h, pozostawiona w tej temperaturze przez 8 h, po czym temperatura jest zwiększana do $+40^{\circ}\text{C}$ w czasie 4 h (przy wilgotności względnej 80%) i próbka pozostaje w niej przez 8 h (rys. 2.5). Jeden cykl trwa 24 h i należy przeprowadzić 7 pełnych cykli zamrażania-odmrażania.

a)



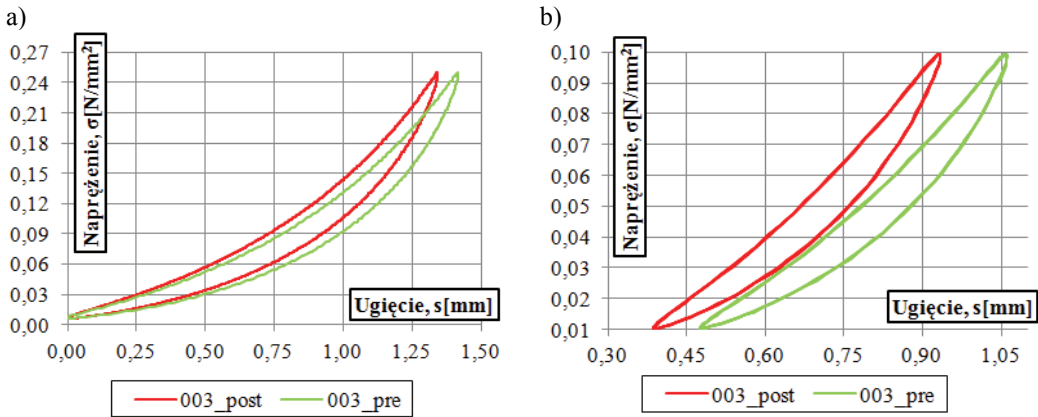
b)



Rysunek 2.5. Próbkki podkładek USP w trakcie badań odporności na warunki atmosferyczne: a) próbki w komorze klimatycznej, b) komora klimatyczna z badanymi próbkami

W przypadku badań odporności na warunki atmosferyczne istotna jest zmiana (wyznaczana w okresie 1÷2 tygodni od zakończenia badania) statycznego i dynamicznego (dla 5 Hz) modułu sztywności podkładki USP, brak uszkodzeń podkładki oraz odpowiednio wysoka wartość przyczepności do betonu przez odrywanie.

Wyniki badań statycznych i dynamicznych modułów sztywności przedstawiono na rys. 2.6, z uwzględnieniem wartości początkowych (przed badaniem odporności na warunki atmosferyczne) – „pre” oraz końcowych (po 1–2 tygodni od wyjęcia z komory) – „post”.



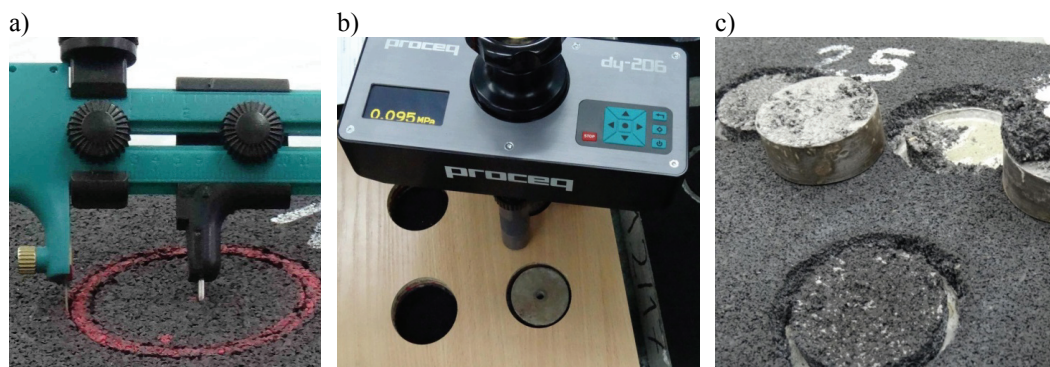
Rysunek 2.6. Badanie odporności na warunki środowiskowe: a) statyczny moduł sztywności, b) dynamiczny moduł sztywności (5 Hz)

2.4. Przyczepność

Podkładka USP jako element połączony z podkładem w sposób trwały, bez względu na technologię montażu rusztu torowego, musi mieć zapewnioną odpowiednią przyczepność do podkładu (wytrzymałość na odrywanie), aby nie oddzieliła się od podpory szynowej w trakcie transportu na miejsce zabudowy lub w trakcie jej wieloletniej eksploatacji.

Badanie przyczepności przez odrywanie (na próbkach po badaniu odporności na warunki atmosferyczne) przeprowadzono według metody „pull-off” zgodnie z procedurą opisaną w normie PN-EN 1542 [9]. Zgodnie z tą metodą w badanej próbce materiału podkładki USP wycięto okręgi o średnicy 50 mm (rys. 2.7a), do których następnie przyklejono stalowe krążki o średnicy 50 mm. Dla każdej próbki podkładki USP wykonano pomiar przyczepności w czterech punktach, których położenie wyznaczono zgodnie z wytycznymi zawartymi w aneksie N normy PN-EN 16730, tj. w odległości minimum 50 mm od krawędzi próbki oraz kolejnego punktu pomiarowego. Wynikiem badania była wartość przyczepności przez odrywanie wyrażona w N/mm². Pomiarów dokonano za pomocą aparatu *Proceq dy-206* (rys. 2.7b). Szybkość odrywania krążka, zgodnie z aneksem E normy PN-EN 16730 [5] była stała i wynosiła 0,01 N/mm²·s. Wyniki badania przedstawiono w tab. 2.2. Po badaniu próbki materiału (rys. 2.7c) określono typ zniszczenia według następujących kryteriów:

- zniszczenie kohezyjne w warstwie kostki betonowej (podkładu betonowego) – typ A;
- zniszczenie kohezyjne w warstwie materiału – typ: B, C, D, E, F, G, H;
- zniszczenie adhezyjne pomiędzy sąsiednimi warstwami – np. typ B/C.



Rysunek 2.7. Badanie przyczepności przez odrywanie: a) wykonanie nacięć w materiale, b) wykonanie pomiaru wytrzymałości na odrywanie za pomocą aparatu „pull-off”, c) próbka podkładki USP po badaniu – widoczny rodzaj zniszczenia

Tablica 2.2. Wartości przyczepności przez odrywanie wyznaczone na próbce prototypowego materiału 003 po badaniu odporności na warunki atmosferyczne

Krażek nr	Przyczepność, N/mm ²	Typ zniszczenia	Warstwy
1	0,33	C/D	0 – stalowy krążek, F – klej Poxipol, E – podkładka USP, D – warstwa klejąca warstwę szepną do podkładki USP, C – warstwa szepna, B – klej StoPox SK100, A – kostka betonowa
2	0,24	C/D	
3	0,32	E/F	
4	0,25	E/F	
wartość średnia	0,29	–	
odchylenie stand.	0,05	–	

3. Model mechaniczny konstrukcji

W zagadnieniach dotyczących analizy wpływu elementów wibroizolacyjnych na zachowanie się konstrukcji nawierzchni drogi szynowej poddanej obciążeniom harmonicznym, wykorzystywane są najczęściej dyskretne modele mechaniczne o małej liczbie stopni swobody. Układy takie złożone są ze skończonej liczby punktów materialnych, sprężyn, tłumików bądź innych elementów odzwierciedlających właściwości bezwładnościowe konstrukcji (punkty materialne bądź bryły sztywne) oraz cechy związane ze zjawiskami akumulowania energii w formie potencjalnej (sprężyny) oraz jej rozpraszania (tłumiki).

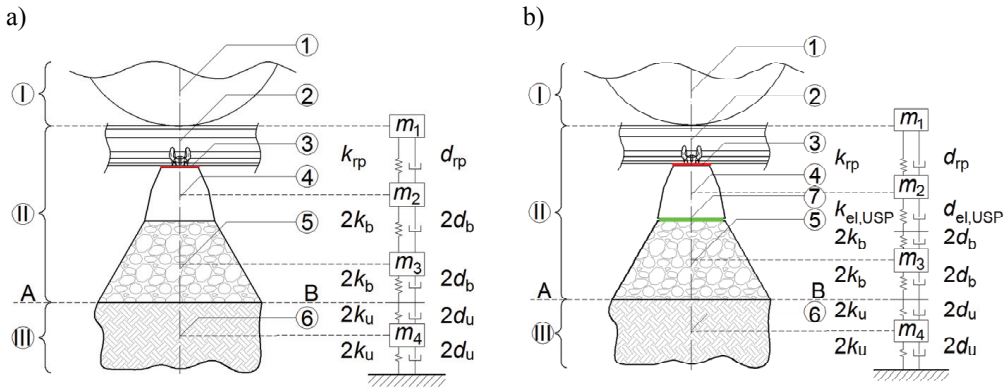
W normie [10], jako model podsypkowej konstrukcji nawierzchni drogi szynowej, przyjęto prosty układ dyskretny składający się z jednego punktu materialnego o zastępczej masie m_{eff} [kg], który charakteryzuje wypadkową bezwład-

ność wszystkich elementów konstrukcji w zakresie drgań pionowych. W modelu tym, własności sprężyste i dyssypacyjne zamodelowano za pomocą prostych struktur reologicznych Kelvina-Voigta (KV) (równoległe połączenie sprężyny i tłumika). Założono przy tym dwupoziomową strukturę KV, w której poziom górny odpowiada zastępczym własnościom podsypki i przekładki podszykowej (parametry k_o [N/m] i d_o [Ns/m]), natomiast poziom dolny charakteryzuje własności podłoża (parametry k_u i d_u). Układ taki nazwano referencyjnym. Uwzględnienie w układzie referencyjnym elementów wibroizolacyjnych w postaci mat podtłuczniowych (UBM) albo podkładek podpodkładowych (USP) wymaga wprowadzenia dodatkowego poziomu struktury reologicznej. We wspomnianej normie [10] układ z matą UBM zawiera dodatkowy poziom struktury KV o parametrach sprężystości k_{e1} i lepkości d_{e1} .

W wielu pracach autorów niniejszego opracowania przyjmowano model zgodny ze standardem zaproponowanym w normie [10] (por. [11, 12]). Należy jednak zwrócić uwagę, że w pracach tych rozpatrywano również bardziej złożone struktury reologiczne charakteryzujące statyczne i dynamiczne cechy UBM [13] albo USP [14], w postaci układów zawierających – obok sprężyn i tłumików – tzw. elementy ułamkowego rzędu opisywane za pomocą pochodnej fraktalnej. Parametry takich struktur były dobierane, przy zastosowaniu algorytmów optymalizacyjnych, na podstawie badań laboratoryjnych w szerokim zakresie częstotliwościowym. Takie podejście nie byłoby możliwe w przypadku przyjęcia prostej struktury KV, której parametry nie mogą wiernie odzwierciedlić wyników badań laboratoryjnych wykonywanych przy różnych częstotliwościach (stałe modelu KV można „nastroić” jedynie na jedną częstotliwość, bądź wyznaczyć średnie wartości na podstawie badań w kilku częstotliwościach wymuszeń).

W niniejszej pracy zaprezentujemy dokładniejszy, autorski model podsypkowej konstrukcji nawierzchni drogi szynowej, składający się z czterech punktów materialnych (4DoF – *Four-Degree of Freedom*), których masy odpowiadają zastępczej charakterystyce bezwładnościowej szyny i taboru m_1 , podkładu m_2 , podsypki m_3 i podłoża m_4 (patrz rys. 3.1a). W modelu 4DoF elementy sprężyste i dyssypacyjne w postaci struktur reologicznych KV charakteryzują własności przekładki podszykowej (parametry k_{tp} i d_{tp}), tłucznia (k_b i d_b) oraz podłoża (k_u i d_u).

Jako układ referencyjny będziemy rozumieli konstrukcję, w której nie zastosowano maty UBM ani podkładki USP. Jak zaznaczono wcześniej, uwzględnienie wymienionych elementów wibroizolacyjnych wymaga rozbudowania modelu 4DoF, o dodatkowy poziom struktury reologicznej. Przykładową strukturę zawierającą podkładkę podpodkładową pokazano na rys. 3.1b. Należy jednak podkreślić, iż na rys. 3.1b przyjęto przykładowy, najprostszy układ KV, charakteryzujący własności podkładki USP. W prezentowanym dalej przykładzie obliczeniowym odwołamy się do bardziej złożonego modelu reologicznego podkładki, analizowanego w pracy [14], którego parametry zostały dobrane na podstawie wyników badań laboratoryjnych.



Rysunek 3.1. Modele reologiczne nawierzchni kolejowej o konstrukcji podsypkowej: a) referencyjny, b) z podkładką USP. Oznaczenia: A-B – płaszczyzna torowiska; cyfry rzymskie w kółeczkach: I – tabor szynowy, II – nawierzchnia kolejowa, III – podtorze; cyfry arabskie w kółeczkach: 1 – nieusprężynowana część pojazdu szynowego, 2 – szyna, 3 – przekładka podszywna (ang. *rail pad*), 4 – podpora szynowa, 5 – podsypka, 6 – podtorze, 7 – podkładka podpodkładowa (USP)

Charakterystykę dynamiczną układu 4DoF, np. w postaci zespolonej funkcji sztywności, można sformułować analitycznie wykorzystując pojęcie transformaty Fouriera. Należy zauważyć, że w zaprezentowanym sformułowaniu model 4DoF należy traktować jako tzw. układ SIMO (ang. *Single Input Multiple Output*), w którym wejściem jest siła harmoniczna $F(t) = f_0 e^{i\omega t}$, o jednostkowej amplitudzie $f_0 = 1$ N i dowolnej częstotliwości ω [rad/s], przykładana do główki szyny. Jako wielkości wyjściowe przyjmujemy przemieszczenia i prędkości odpowiadające czterem stopniom swobody układu 4DoF. Dla tak zdefiniowanego modelu mechanicznego otrzymujemy cztery zespolone funkcje sztywności K_{ij}^* , gdzie i oznacza nr wejścia (w rozważanym przypadku $i = 1$), natomiast j – wielkość wyjściową. Przyjmujemy następującą numeryzację wyjść: 1 – główka szyny, 2 – podkład, 3 – podsypka, 4 – podłoże.

Należy podkreślić, że stosowana w pracy metodyka zawiera się w zakresie teorii liniowych układów dynamicznych. Uzyskane wyniki pozwalają na znalezienie odpowiedzi konstrukcji w postaci amplitudy i kąta przesunięcia fazowego w ustalonych stanach drgań harmonicznych. W wyniku przeprowadzonych analiz, sformułowano następujące wzory opisujące zespolone funkcje sztywności, w odniesieniu do układu referencyjnego:

$$K_{11}^* = k_1^*, \quad (3.1a)$$

$$K_{12}^* = k_2^* \left(1 + \frac{m_1 \omega^2}{K_{11}^*} \right)^{-1}, \quad (3.1b)$$

$$K_{13}^* = k_3^* \left(1 + \frac{m_1 \omega^2}{K_{11}^*} + \frac{m_2 \omega^2}{K_{12}^*} \right)^{-1}, \quad (3.1c)$$

$$K_{14}^* = k_4^* \left(1 + \frac{m_1 \omega^2}{K_{11}^*} + \frac{m_2 \omega^2}{K_{12}^*} + \frac{m_3 \omega^2}{K_{13}^*} \right)^{-1}, \quad (3.1d)$$

przy zastosowaniu następujących oznaczeń:

$$k_4^* := -m_4 \omega^2 + 2k_u + 2d_u i \omega, \quad (3.2a)$$

$$k_3^* := -m_3 \omega^2 + \left(\frac{1}{k_{bu} + d_{bu} i \omega} + \frac{1}{k_4^*} \right)^{-1}, \quad (3.2b)$$

$$k_2^* := -m_2 \omega^2 + \left(\frac{1}{2k_b + 2d_b i \omega} + \frac{1}{k_3^*} \right)^{-1}, \quad (3.2c)$$

$$k_1^* := -m_1 \omega^2 + \left(\frac{1}{k_{rp} + d_{rp} i \omega} + \frac{1}{k_2^*} \right)^{-1}, \quad (3.2d)$$

$$k_{bu} := \frac{2k_b k_u}{k_b + k_u}, \quad d_{bu} := \frac{2d_b d_u}{d_b + d_u}. \quad (3.2e)$$

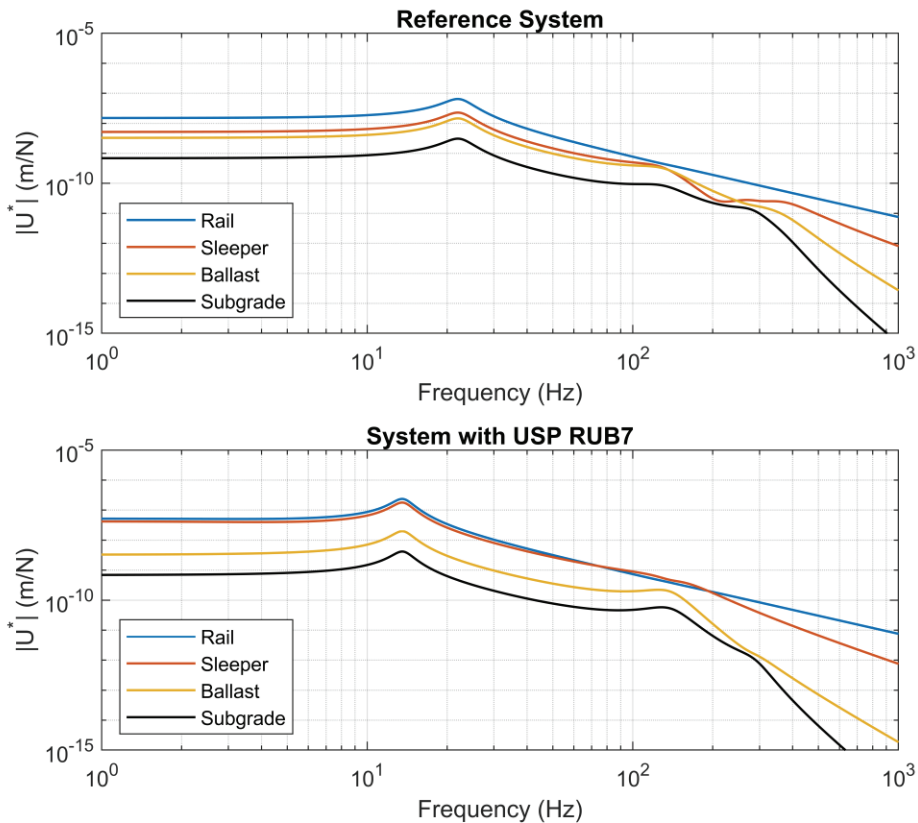
Przedstawione relacje można stosunkowo łatwo rozbudować dołączając człony odpowiadające zespolonym sztywnościom elementów wibroizolacyjnych (UBM albo USP). Odpowiednie formuły podano w cytowanych pracach [13, 14]. Ponadto, istnieje możliwość uwzględnienia zjawiska tzw. tłumienia konstrukcyjnego w podatnych elementach konstrukcji nawierzchni, poprzez współczynnik stratności η (ang. *loss factor*), jak pokazano w normie [10] i pracach [11, 12].

Zestawienie parametrów modelu 4DoF, dotyczące układu referencyjnego, zawarto w tab. 3.1. W przykładzie obliczeniowym wykorzystamy dodatkowo parametry modelu reologicznego charakteryzującego podkładkę podpodkładową 003. Parametry tego modelu, wyniki własnych badań laboratoryjnych oraz autorską procedurę wyznaczania stałych modelowych opisano w pracy [14].

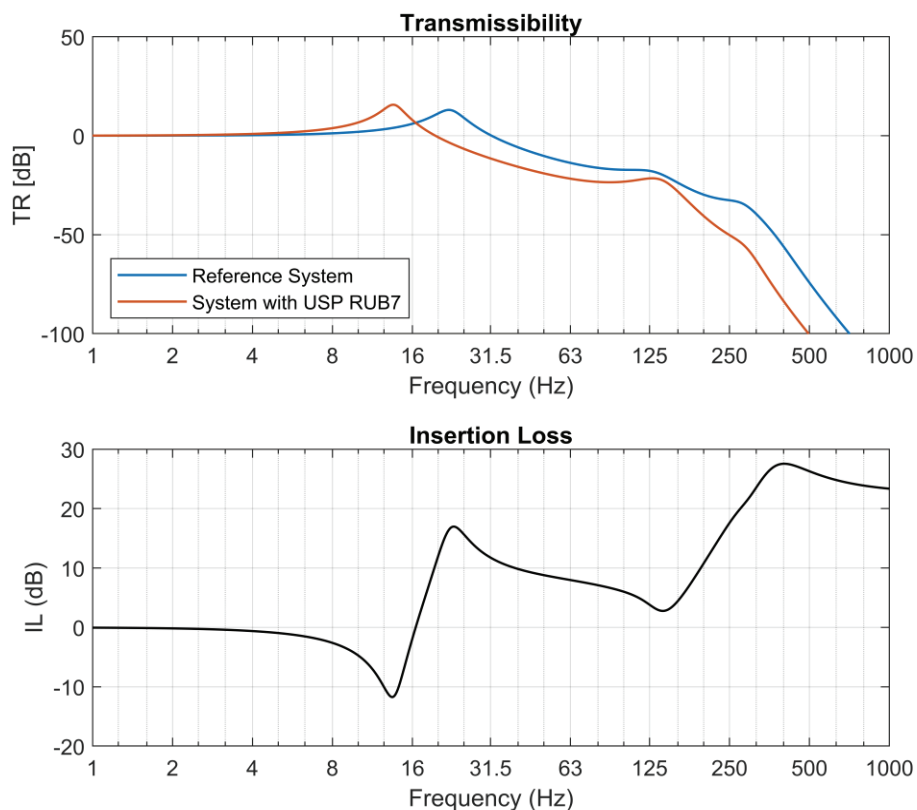
Tablica 3.1. Parametry modelu 4DoF (układ referencyjny)

Nr	Warstwa	Masa zastępcza [kg]	Sztywność [N/m]	Moduł lepkości [Ns/m]	Współczynnik stratności [1]
1	Szyna z przekładką + tabor szynowy	$m_1 = 3351$	$k_{rp} = 1,00E8$	$d_{rp} = 1,0E5$	$\eta_{rp} = 0,05$
2	Podkład	$m_2 = 165$	–	–	–
3	Podsypka	$m_3 = 422$	$k_b = 2,50E8$	$d_b = 0$	$\eta_b = 0,35$
4	Podłoże	$m_4 = 603$	$k_u = 2,50E8$	$d_u = 0$	$\eta_u = 0,30$

Na podstawie obliczeń wykonanych z wykorzystaniem autorskiego programu napisanego w systemie Matlab uzyskano charakterystyki częstotliwościowe modelu 4DoF w postaci składowych (rzeczywistej, urojonej, modułu i fazy) zespolonych funkcji sztywności i podatności. Sporządzono również wykresy funkcji przenoszenia drgań (ang. *Transmissibility*) oraz tłumienia dodanego (ang. *Insertion Loss*) obrazujące wpływ podkładki USP na charakterystykę dynamiczną układu. Poniżej zamieszczono jedynie przykładowe wykresy funkcji podatności dynamicznej (rys. 3.2) oraz przenoszenia drgań i tłumienia dodanego (rys. 3.3). Wykresy na rys. 3.2 obrazują amplitudy przemieszczeń poszczególnych elementów konstrukcji nawierzchni wywołane jednostkową siłą harmoniczną przykładaną na główkę szyny (USP RUB7 oznacza badaną podkładkę 003). Analizując wykresy na rys. 3.3 można określić zakres efektywności podkładki USP, czyli zakres takich częstotliwości wymuszenia, przy których otrzymano dodatnią wartość tłumienia dodanego.



Rysunek 3.2. Wykresy funkcji podatności dynamicznych: układ referencyjny (rys. górny) i układ z podkładką USP (rys. dolny)



Rysunek 3.3. Wykresy funkcji przenoszenia drgań (rys. górny) i tłumienia dodanego (rys. dolny)

4. Podsumowanie i wnioski

W niniejszej pracy przedstawiono wybrane badania laboratoryjne i symulacje komputerowe wyrobów określanych jako izolatory wibroakustyczne, stosowanych w budowie i naprawach dróg szynowych w celu ograniczenia niekorzystnych oddziaływań generowanych przez ruch pojazdów szynowych po torze (wibracje i hałas). Skupiono się na jednym z rodzajów tych izolatorów, tj. podkładkach podpodkładowych (USP – skrót od ang. *under sleeper pads*), stosowanych w podsypkowych konstrukcjach dróg szynowych. Opisano ich charakterystyczne, istotne właściwości, cechy funkcjonalne i eksploatacyjne.

Opisane zostały następujące badania laboratoryjne podkładek USP: badanie statycznego i dynamicznego modułu sztywności, badanie wytrzymałości zmęczeniowej i odporności na warunki atmosferyczne oraz przyczepności przez odrywanie. W pracy zamieszczono wyniki badań statycznych i dynamicznych dla podkładki USP na bazie granulatu gumowego SBR o gr. 7 mm, oznaczanej jako podkładka nr 003. Badania zmęczeniowe wykonywane były do 500 tysięcy

cykli obciążenia i miały na celu wstępną weryfikację, czy podkładka jest w stanie zapewnić w trakcie eksploatacji stabilne właściwości po jej zastosowaniu w nawierzchni kolejowej jako elementu redukującego naprężenia występujące w podsypce – w szczególności w warstwie bezpośrednio pod podkładem – oraz redukującego emitowane do otoczenia drogi kolejowej drgania materiałowe (wibracje i hałas wtórny). Analiza wyników wskazuje, że badany prototypowy materiał nr 003 wykazuje korzystne właściwości z punktu widzenia trwałości zmęczeniowej. Zmiany sztywności są nieduże ($< 20\%$) i mieszczą się w przyjmowanych w literaturze dopuszczalnych wartościach, a krzywe sztywności po okresie od jednego do dwóch tygodni po zakończeniu testów zmęczeniowych leżą stosunkowo blisko krzywych początkowych. W badaniach wpływu warunków atmosferycznych na ustalone cechy podkładek USP, próbki zostały przytwierdzone do betonowych kostek i zanurzone w wodzie na 24 h, a następnie umieszczone w komorze klimatycznej, gdzie były poddane naprzemiennym cyklom zamrażania-odmrażania. Wyniki badań wykazały, że oba rodzaje przeprowadzonych testów wpływają na zmianę sztywności podkładek USP, co z kolei ma wpływ na ich właściwości tłumiące.

Ponadto w pracy zaprezentowano autorski model podsypkowej konstrukcji nawierzchni drogi szynowej, składający się z czterech punktów materialnych (4DoF – *Four-Degree of Freedom*), których masy odpowiadają zastępczej charakterystyce bezwładnościowej szyny i taboru, podkładu, podsypki i podłoża. Na podstawie obliczeń wykonanych z wykorzystaniem autorskiego programu napisanego w systemie Matlab uzyskano charakterystyki częstotliwościowe modelu 4DoF w postaci składowych (rzeczywistej, urojonej, modułu i fazy) zespolonych funkcji sztywności i podatności. Sporządzono również wykresy funkcji przenoszenia drgań (ang. *Transmissibility*) oraz tłumienia dodanego (ang. *Insertion Loss*) obrazujące wpływ podkładki USP na charakterystykę dynamiczną układu.

Praca powstała w ramach projektów „Innowacyjne rozwiązania w zakresie ochrony ludzi i budynków przed drganiami od ruchu kolejowego” oraz „Innowacyjne rozwiązania w zakresie ochrony ludzi i środowiska przed hałasem od ruchu kolejowego” współfinansowanych ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój 2014-2020 (nr umów odpowiednio: POIR.04.01.01-00-0029/17 i POIR.04.01.01-00-0030/17).

Bibliografia

- [1] Kraśkiewicz C., Oleksiewicz W., Zbiciak A.: Podkładki podpodkładowe w podsypkowej konstrukcji nawierzchni dróg szynowych – techniczne i formalne aspekty stosowania, *Archiwum Instytutu Inżynierii Lądowej*, 25, 2017, s. 221–243.
- [2] Abadi T., Le Pen L., Zervos A., Powrie W.: Effect of Sleeper Interventions on Railway Track Performance, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 145, 4, 2019, 04019009.

- [3] Jayasuriya C., Indraratna B., Ngo T.N.: Experimental study to examine the role of under sleeper pads for improved performance of ballast under cyclic loading, *Transportation Geotechnics*, 19, 2019, pp. 61–73.
- [4] Kraśkiewicz C., Oleksiewicz W., Płudowska-Zagrajek M., Piotrowski A.: Testing procedures of the Under Sleeper Pads applied in the ballasted rail track systems, *MATEC Web of Conferences*, 196, 2018, 02046.
- [5] PN-EN 16730:2016-08 Kolejnictwo – Tor – Podkłady i podrozdajdnice betonowe z podkładkami podpodkładowymi, Polski Komitet Normalizacyjny, 2016.
- [6] IRS 70713-1: Railway Application – Track & Structure “Under Sleeper Pads (USP) – Recommendations for Use”, 1st edition 01.04.2018.
- [7] RFI TCAR SF AR 03 007 C, Specifica tecnica di forniture: Tappetini sotto traversa (USP), 2017.
- [8] SNCF IG04013 Traverses et supports béton pour pose ballastée équipées de semelles résilientes en sous faces (ex CT IGEV 016) 14.08.2018.
- [9] PN-EN 1542:2000 Wyroby i systemy do ochrony i napraw konstrukcji betonowych – Metody badań - Pomiar przyczepności przez odrywanie. PKN, Warszawa 2000.
- [10] DIN 45673-4:2008-07 Mechanical vibration. Resilient elements used in railway tracks. Part 4: Analytical evaluation of insertion loss of mounted track systems.
- [11] Zbiciak A., Kraśkiewicz C., Lipko C., Oleksiewicz W.: Viscoelastic dynamic models of resilient elements used in railway tracks. *IPICSE-2016, MATEC Web of Conferences* 86, 2016, 01015.
- [12] Zbiciak A., Kraśkiewicz C., Oleksiewicz W., Płudowska-Zagrajek M., Lipko C.: Mechanical modelling and application of vibroacoustic isolators in railway tracks, *XXVI R-S-P Seminar, Theoretical Foundation of Civil Engineering, MATEC Web of Conferences* 117, 2017, 00090.
- [13] Kraśkiewicz C., Zbiciak A., Oleksiewicz W., Piotrowski A.: The influence of selected static and dynamic parameters of resilient mats on vibration reduction of railway tracks, *BalCon 2018, MATEC Web of Conferences* 219, 2018, 05002.
- [14] Kraśkiewicz C., Zbiciak A., Oleksiewicz W., Karwowski W.: Static and dynamic parameters of railway tracks retrofitted with under-sleeper pads. *Archives of Civil Engineering*, 64, 4, part 2/2, 2018, pp. 187–201.

Abstract

The present paper discusses the functional and operational features of vibroacoustic isolators that are used in the construction and repair of rail track systems in order to reduce the unfavourable effects caused by the rolling stock (vibration and noise). The authors focus on a specific type of such isolators, which are called under sleeper pads (USP). They are used in the ballasted track systems to reduce the dynamic effects transferred through the rails, fastening system and rail supporting structure to the ballast. Several testing procedures and numerical simulations of USP are presented. Results of four tests: static and dynamic bedding modulus, fatigue strength, resistance to severe environmental conditions and pull-off strength, obtained for the analysed USP material (a styrene-butadiene rubber-based pad glued with a polyurethane glue, 7 mm thick) are discussed. Moreover, an original discrete mechanical model of a ballasted railway track is proposed. It is a 4DoF (Four-Degree of Freedom) model with masses corresponding to the inertial characteristics of: rail and rolling stock, sleeper, ballast and track bed. The mechanical model allowed the authors to obtain the diagrams of transmissibility and insertion loss functions, which illustrate the influence of USP on the dynamic characteristics of the system.