

PARAMETRY CHARAKTERYZUJĄCE WIBROIZOLACYJNE MATY PODPŁYTOWE STOSOWANE W KONSTRUKCJI DRÓG SZYNOWYCH I METODY ICH BADANIA¹

Cezary Kraśkiewicz

mgr inż., Zespół Dróg Szynowych, Instytut Dróg i Mostów, Wydział Inżynierii Łączowej Politechniki Warszawskiej, Al. Armii Ludowej 16, 00-637 Warszawa, e-mail: c.kraskiewicz@il.pw.edu.pl

Cezary Lipko

mgr inż., TINES Capital Group SA, ul. Królowej Jadwigi 192, 30-212 Kraków, e-mail: c.lipko@tines.pl

Wojciech Oleksiewicz

dr inż., Zespół Dróg Szynowych, Instytut Dróg i Mostów, Wydział Inżynierii Łączowej Politechniki Warszawskiej, Al. Armii Ludowej 16, 00-637 Warszawa, e-mail: w.oleksiewicz@il.pw.edu.pl

Artur Zbiciak

dr hab. inż., Zakład Mechaniki Teoretycznej i Mechaniki Nawierzchni Komunikacyjnych, Instytut Dróg i Mostów, Wydział Inżynierii Łączowej Politechniki Warszawskiej, Al. Armii Ludowej 16, 00-637 Warszawa, e-mail: a.zbiciak@il.pw.edu.pl

Streszczenie. *W artykule przedstawiono istotne właściwości charakteryzujące grupę wyrobów określanych jako maty wibroizolacyjne stosowane w konstrukcjach dróg szynowych, głównie do izolacji wibroakustycznej – tzn. głównie do ochrony przed wpływem wibracji od ruchu pojazdów szynowych oddziaływujących na obiekty budowlane zlokalizowane w otoczeniu trasy tych dróg i ludzi przebywających w budynkach podlegających takim oddziaływaniom. Maty wibroizolacyjne pośrednio ograniczają także oddziaływania akustyczne w budynkach, które pod wpływem wibracji, poprzez drgania ścian i stropów emitują tzw. hałas wtórny w budynkach. Na tle podstawowej klasyfikacji mat wibroizolacyjnych opisano ich istotne charakterystyki funkcjonalne i eksploatacyjne dotyczące jednego z dwóch rodzajów mat, tj. mat wibroizolacyjnych podpłytowych stosowanych w systemach konstrukcyjnych dróg szynowych określanych jako systemy masy odsprężynowanej.*

Słowa kluczowe: *konstrukcja dróg szynowych, izolatory wibroakustyczne, maty wibroizolacyjne, bezpodsyphkowa nawierzchnia szynowa, redukcja wibracji, systemy masy odsprężynowanej.*

1. Wstęp

Maty wibroizolacyjne są stosowane w konstrukcji dróg szynowych (kolejowych, tramwajowych i metra) w celu redukcji dynamicznych oddziaływań od ruchu pojazdów szynowych w postaci drgań materiałowych na otoczenie ich tras. Redukcja tych oddziaływań dotyczy głównie wibracji (drgań materiałowych pionowych i poprzecznych) oraz pośrednio także hałasu (dźwięków powietrznych) – w postaci tzw. hałasu wtórnego emitowanego wewnątrz i na zewnątrz bu-

¹ Wkład autorów w publikację: Kraśkiewicz C.: 30%, Lipko C.: 20%, Oleksiewicz W.: 30%, Zbiciak A.: 20%.

dynków przez wzbudzone wibracjami elementy ich konstrukcji (ściany i stropy) i różne elementy obiektów inżynierskich. Maty wibroizolacyjne są stosowane w podsypkowych i bezpodsypkowych konstrukcjach dróg szynowych. Stosowane w konstrukcjach podsypkowych maty podtłuczniowe zwiększają sprężystość podsypki tłuczniowej, zmniejszając tym samym transmisję drgań do podtorza i dalej do otoczenia trasy. Jest to funkcja istotna zwłaszcza w nawierzchniach położonych na obiektach inżynierskich takich jak mosty, wiadukty, estakady i tunele zlokalizowane w strefie oddziaływania na środowisko miejskie. Właściwości mat podtłuczniowych, istotne z uwagi na ich funkcje wibroizolacyjne oraz metody ich badania zostały przedstawione w analogicznym opracowaniu [5] niniejszego zespołu autorskiego.

W nawierzchniach o konstrukcji bezpodsypkowej, maty wibroizolacyjne spełniają podobne funkcje, jak maty podtłuczniowe, ale powinny one być dostosowane odpowiednio do specyfiki takich konstrukcji. W konstrukcjach bezpodsypkowych z podbudową w postaci płyty betonowej, maty wibroizolacyjne, określane dodatkowo jako podpłytkowe, są zwykle układane poziomo i pionowo, bezpośrednio pod i z boków betonowej płyty podbudowy (rys. 3), stanowiącej dzięki temu sprężyste posadowioną warstwę nośną dla nawierzchni szynowej. Powstały w ten sposób układ mas i warstw sprężystych tworzy konstrukcję drogi szynowej, określaną jako system masy odsprężynowanej o dużej skuteczności tłumienia drgań, zwłaszcza w zakresach niskich częstotliwości. Systemy masy odsprężynowanej charakteryzują się wysokim poziomem tłumienia wibracji i hałasu wtórnego dla częstotliwości wzbudzenia drgań o wartościach powyżej wartości częstotliwości drgań własnych systemu.

Maty wibroizolacyjne mogą być klasyfikowane ze względu na różne kryteria – np. zakres ich zastosowania, rodzaj materiału z którego są wykonane, technologię produkcji, czy też strukturę gotowego wyrobu.

Ze względu na zakres zastosowania w różnych rodzajach konstrukcji dróg szynowych maty wibroizolacyjne można podzielić na:

- a. maty podtłuczniowe (*UBM* – skrót od ang. *Under-BallastMats* lub *SBM* – skrót od ang. *Sub-BallastMats* lub *USM* – skrót od niem. *Unterschottermatten*), przeznaczone do podsypkowej konstrukcji drogi szynowej (do układania pod warstwą podsypki tłuczniowej), wśród których są wyróżniane dwie odmiany klasyfikowane z uwagi na główny cel ich zastosowania:
 - stosowane przede wszystkim dla celów wibroizolacji,
 - stosowane przede wszystkim dla celów redukcji naprężeń w podsypce;
- b. maty podpłytkowe (do układania pod betonową płytą torową, ewentualnie również z boków tej płyty – rys. 3 i 4) w systemach masy odsprężynowanej (*STM* – skrót od ang. *Slab-TrackMats*), wśród których są wyróżniane trzy odmiany klasyfikowane z uwagi na sposób podparcia konstrukcji nawierzchni:
 - podparcie punktowe (dyskretne) – rys. 1 i 2,
 - podparcie pasmowe (maty taśmowe) – rys. 1 i 2,
 - podparcie powierzchniowe (maty ciągłe) – rys. 3 i 4.

Należy nadmienić, że maty podtłuczniowe mogą być bez przeszkód stosowane zamiast mat podpłytkowych w systemach masy odsprężynowanej. Natomiast zastosowanie maty wibroizolacyjnej podpłytkowej przeznaczonej do systemów masy odsprężynowanej, jako maty podtłuczniowej – tzn. bezpośrednio pod podsypką tłuczniową, wymaga zabezpieczenia ewentualnych uszkodzeń maty podpłytkowej przez ostre krawędzie tłucznia dodatkową warstwą ochronną w postaci geosyntetyku.

Ze względu na stosowane materiały i technologie produkcji maty wibroizolacyjne można podzielić na maty wykonane z różnego rodzaju elastomerów (maty elastomerowe) lub maty z wełny mineralnej. Wśród mat elastomerowych wyróżnia się:

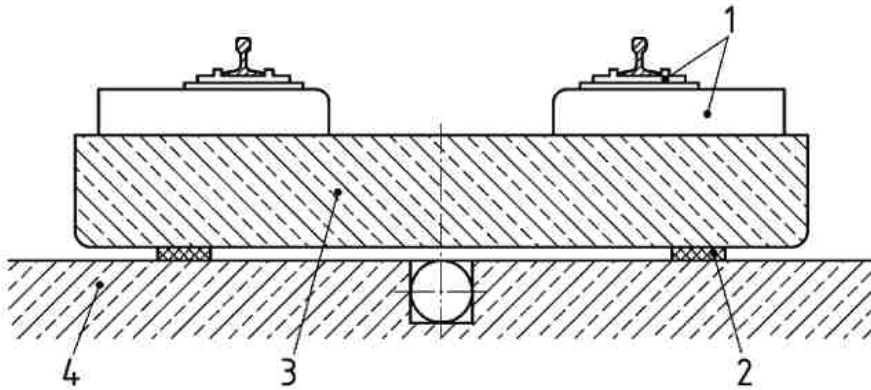
- a. maty na bazie poliuretanu w odmianach z porami zamkniętymi lub otwartymi;
- b. maty gumowe (kompozytowe, na bazie mieszanek kauczuku naturalnego lub/i kauczuku syntetycznego), których sprężystość zapewniona jest przez kształt (kanaliki, rowki lub różnego kształtu wypustki) i strukturę przekroju maty (gęstość i objętość porów).

Maty wibroizolacyjne mogą mieć jednolitą strukturę przekroju (homogeniczną) albo strukturę warstwową z warstwami różnych materiałów (tzw. przekrój Sandwich), z których jedne spełniają podstawową funkcję wibroizolacyjną, a inne funkcję wzmacniającą lub rozkładającą bardziej równomiernie obciążenia działające na matę.

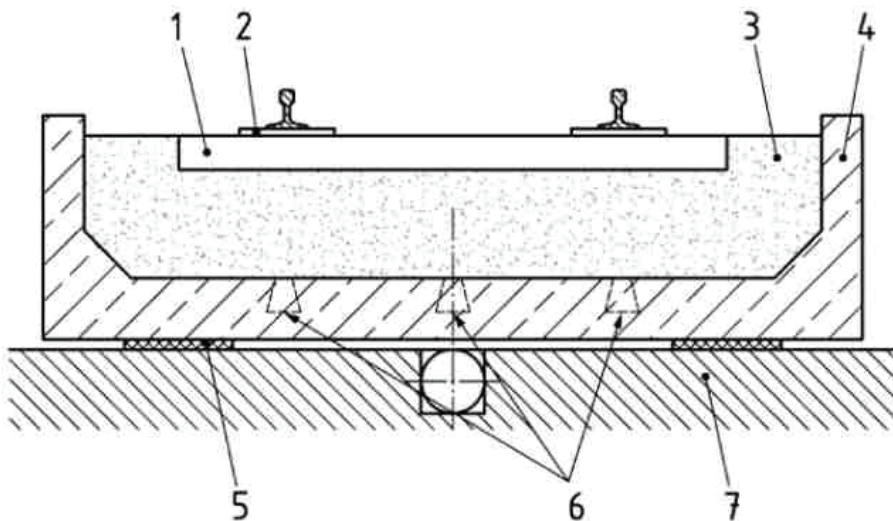
Norma niemiecka DIN 45673-7 [3], która w krajach europejskich jest jedynym dokumentem normatywnym dotyczącym mat wibroizolacyjnych, opisującym metody badania elementów sprężystych stosowanych w systemach masy odsprężynowanej, w następujący sposób określa podstawowe ich typy stosowane w konstrukcji dróg szynowych i systematykę sposobów podparcia masy odsprężynowanej:

- podparcie punktowe (stalowe sprężyny lub elastomerowe podkładki);
- podparcie pasmowe za pomocą mat wibroizolacyjnych;
- podparcie powierzchniowe za pomocą elastomerowych mat wibroizolacyjnych”.

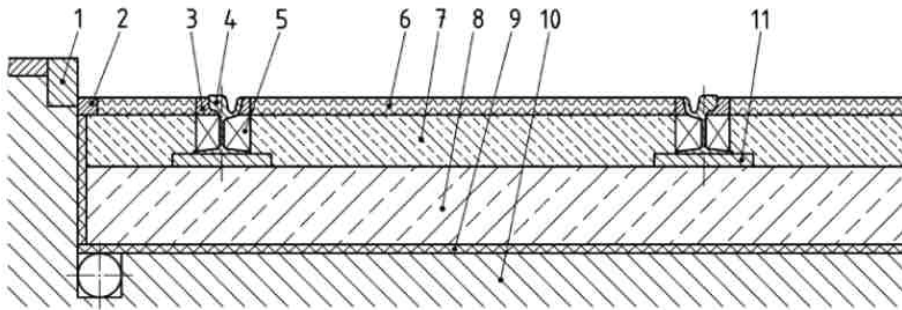
Systemy masy odsprężynowanej, których przykłady pokazano na rys. 1-4 są indywidualnymi rozwiązaniami i charakteryzują się znacznym zróżnicowaniem w zakresie podstawowych wymiarów elementów składowych, a także elementów sprężystych użytych do podparcia płyty torowej. Dlatego też nie jest możliwe podanie jednolitego zakresu obciążeń podczas badań elementów sprężystych, gdyż ich zakresy wynikają z zaprojektowanego ukształtowania danego rozwiązania systemu masy odsprężynowanej i należy je wyznaczać indywidualnie dla konkretnej konstrukcji.



Rys. 1. Przykład konstrukcji drogi szynowej według systemu masy odsprężynowanej {3}
 Oznaczenia: 1 – system przytwierdzenia i podpora szynowa, 2 – mata wibroizolacyjna zastosowana jako podparcie punktowe lub pasmowe, 3 – betonowa płyta torowa, 4 – spąg np. tunelu stanowiący podtorze wraz z kanałem odwadniającym

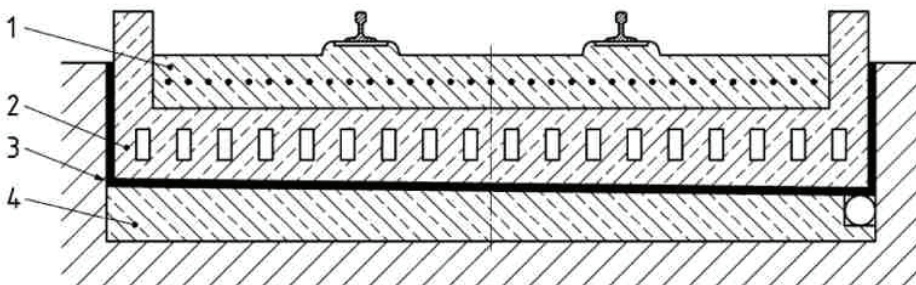


Rys. 2. Przykład konstrukcji drogi szynowej według systemu masy odsprężynowanej {3}
 Oznaczenia: 1 – podkład, 2 – system przytwierdzenia szyny, 3 – podsypka, 4 – betonowe koryto dla podsypki, 5 – mata wibroizolacyjna zastosowana jako podparcie punktowe lub pasmowe, 6 – wgłębienie będące elementem służącym do połączenia kolejnych betonowych koryt, 7 – spąg np. tunelu stanowiący podtorze wraz z kanałem odwadniającym



Rys. 3. Przykład konstrukcji drogi szynowej według systemu masy odsprężynowanej (3)

Oznaczenia: 1 – krawężnik separacyjny, 2 – sprężyste połączenie, 3 – masa zalewowa uszczelniająca, 4 – szyna rowkowa, 5 – profile przyszytowe lub masa zalewowa, 6 – zabudowa torowiska w postaci betonu asfaltowego, 7 – zabudowa torowiska w postaci betonu cementowego, 8 – podbudowa torowiska w postaci płyty z betonu zbrojonego, 9 – mata wibroizolacyjna zastosowana jako podparcie powierzchniowe, 10 – podłoże gruntowe/warstwa ochronna o odpowiednim module odkształcenia z kanałem odwadniającym, 11 – cieżka przekładka podszynowa



Rys. 4. Przykład konstrukcji drogi szynowej według systemu masy odsprężynowanej (3)

Oznaczenia: 1 – betonowa płyta torowa, 2 – betonowa płyta stanowiąca koryto dla płyty torowej wraz z łącznikami pomiędzy sąsiednimi elementami, 3 – mata wibroizolacyjna zastosowana jako podparcie powierzchniowe, 4 – płyta betonowa o pochyleniu poprzecznym z kanałem odwadniającym

2. Potrzeba opracowania jednolitych wymagań technicznych dla mat wibroizolacyjnych

Praktyczne problemy związane z Prawem Zamówień Publicznych, będące przedmiotem bliższej charakterystyki opisanej w pracy [5] stanowią przyczynę postulowanego przez Autorów ujednoczenia charakterystyk technicznych mat wibroizolacyjnych istotnych z punktu widzenia ich zasadniczych funkcji spełnianych w dokumentacjach projektowych dla konstrukcji dróg szynowych opracowywanych w postaci następujących dokumentów: *Specyfikacje techniczne wykonania i odbioru robót (STWiORB)*, *Specyfikacja istotnych warunków zamówienia (SIWZ)* lub *Program funkcjonalno-użytkowy (PFU)*. W odniesieniu do wymienionych powyżej dokumentów projektowych charakterystyki techniczne mat wibroizolacyjnych

mają charakter określonych wymagań techniczno-funkcjonalnych dotyczących cech materiałowych (parametrów fizyczno-wytrzymałościowych) najbardziej istotnych dla spełnienia przez matę jej zasadniczych funkcji, które można ogólnie określić jako:

- a. skuteczna wibroizolacja, polegająca na maksymalnej redukcji poziomu oddziaływań w postaci wibracji i hałasu wtórnego i dodatkowo na zwiększeniu ochrony otoczenia danej trasy komunikacyjnej przed wpływem prądów błądzących;
- b. zwiększona trwałość eksploatacyjna, polegająca na utrzymaniu zdolności do długotrwałego spełniania funkcji wymienionych powyżej w pkt. a, w realnych warunkach eksploatacyjnych, co jest związane z ograniczoną do maksymalnie 20% zmiennością wartości głównych parametrów stwierdzaną podczas laboratoryjnych badań zmęczeniowych, przeprowadzanych w warunkach symulujących ekstremalne warunki eksploatacyjne.

Ciekawym przykładem, przedstawionym w pracy [13], niewłaściwego określenia parametrów mat wibroizolacyjnych wyszczególnionych w dokumentacji projektowej jednego z przetargów i zawartego w treści *STWiORB (T.02.02.08): Wykonanie warstwy wibroizolacyjnej z maty*, gdzie przedstawiono właściwości, jakie powinna wykazywać mata pod płytowa zastosowana jako wibroizolacja pozioma oraz pionowa w torowisku tramwajowym. Brzmiały one następująco (cytowane fragmenty są zaznaczone kursywą, natomiast w nawiasach w oddzielnych wierszach podane są komentarze):

„1.2.1 Mata wibroizolacyjna

Należy zastosować maty na bazie granulatu gumowego, spełniające następujące parametry:

- *materiał granulatu gumowy spajany żywicą,*
- *grubość: 20 mm,*
- *szttywność statyczna: 0,0097 N/mm³,*
(Szttywność statyczna i dynamiczna zależne są od zakresu obciążeń, w jakich są one określane. Brak jest informacji, dla jakich zakresów zostały określone sztywności zarówno statyczna, jak i dynamiczna – poniżej. Uniemożliwia to odniesienie się do tej wartości i dobór odpowiedniego produktu.)
- *szttywność dynamiczna: 0,019 N/mm³ przy 5 Hz oraz 0,0209 N/mm³ przy 10 Hz,*
- *współczynnik przeszttywnienia dynamicznego: ≤ 2,2 (1,95 przy 5 Hz oraz 2,15 przy 10 Hz),*
- *zmiana sztywności dynamicznej po badaniu zmęczeniowym: ≤ 4% przy 5 Hz oraz ≤ 1% przy 10 Hz,*

(Również brak jest informacji na temat normy, wg której należy badać wytrzymałość zmęczeniową lub procedury, dla ilu cykli obciążeń należy określić zmianę sztywności. Tak niewielka zmiana sztywności jest bardzo restrykcyjnym wymaganiem, np. norma DIN 45673-7[3] jako akceptowalną wartość zmiany sztywności statycznej po badaniach zmęczeniowych podaje wartość <20%. Zgodnie z powyższym wymaganiem zmiana sztywności dynamicznej przy wartości wyjściowej 0,0209 N/mm³ wynosi 0,000209 N/mm³, co

oznacza przy obciążeniu np. 0,021 MPa, zmianę wielkości ugięcia próbki o 0,01 mm. Wyznaczenie tak niewielkiej zmiany ugięcia wymaga bardzo specjalistycznego oprzyrządowania do jego pomiaru, a przy uwzględnieniu niepewności pomiaru i dokładności maszyny wytrzymałościowej jest w zasadzie nie do wykonania.)

- wydłużenie przy zerwaniu > 40%.
(...)

1.5.2 Wbudowanie maty wibroizolacyjnej

Poziomą matę wibroizolacyjną należy układać na zagęszczone i równe podłoże, wykonane wg dokumentacji projektowej. Arkusze maty wibroizolacyjnej należy łączyć ze sobą za pomocą taśmy samoprzylepnej, wzdłuż styków, z pozostawieniem krótkich przerw włączeni – około 10 cm / 100 cm – w celu umożliwienia przedostawiania się wody, która może zbierać się na powierzchni maty (w przypadku przesiąkania przez żelbetową płytę torową lub przy krawędzi pionowej maty wibroizolacyjnej) (...).

(Nie wolno pozostawiać przerw włączeni poszczególnych arkuszy maty, gdyż powstają wtedy mostki wibracyjne. Przerwa o szerokości 10 cm jest stosunkowo duża. W trakcie montażu mat zdarzają się przerwy kilkumilimetrowe pomiędzy arkuszami, ale są to błędy związane z niedokładnością wykonania, na które trzeba zwracać szczególną uwagę. Sugerowanie, że między arkuszami maty powinien być odstęp, żeby umożliwić odpływ wody nagromadzonej na powierzchni maty jest wysoce nieprawidłowe. Mata przed wylaniem betonowej płyty torowej zabezpieczana jest folią polietylenową na całej powierzchni, aby właśnie uniemożliwić nasiąkanie maty wodą pochodzącą np. od mokrej mieszanki betonowej. Natomiast jeśli woda przedostaje się pod płytę torową na styku krawędzi płyty i maty zamontowanej w postaci jej pionowej wibroizolacji, to jest to błąd wykonawczy, związany z niewłaściwym uszczelnieniem tego miejsca.)

Powyższy przykład niewłaściwego opisu wymaganych cech zamawianej maty wibroizolacyjnej potwierdza potrzebę jednolitego, oficjalnego uregulowania normatywnego lub w postaci odpowiednich instrukcji branżowych, z których będą mogli korzystać Projektanci i Zamawiający dążący do tego, aby ich dokumenty były zgodne z zasadami Prawa zamówień publicznych.

3. Istotne dla eksploatacji właściwości funkcjonalne mat wibroizolacyjnych podpłytkowych stosowanych w konstrukcji dróg szynowych w systemach masy odsprężynowanej

Określone w pkt. 2 ogólne wymagania techniczno-funkcjonalne dotyczące mat wibroizolacyjnych produkowanych głównie z elastomerów wymagają wskazania cech materiałowych (parametrów fizyczno-wytrzymałościowych) najbardziej istotnych dla spełnienia przez matę jej zasadniczych funkcji. W sytuacji braku polskiej oraz europejskiej normy określającej takie parametry, należy posłużyć się wyma-

ganiem niemieckiej normy DIN 45673-7 [3], stosowanej w wielu krajach europejskich. Za wykaz parametrów najbardziej istotnych dla oceny jakościowej mat wibroizolacyjnych stosowanych w systemach masy odsprężynowanej należy uznać następujące parametry, wybrane z uwagi na:

- A) podstawową funkcję izolacji wibroakustycznej:
- sztywność statyczna pionowa ($k_{stat,z}$) i dynamiczna ($k_{dyn,z}$) oraz statyczny ($C_{stat,z}$) i dynamiczny ($C_{dyn,z}$) moduł sprężystości pionowej podłoża,
 - sztywność statyczna pozioma ($k_{stat,b}$) oraz statyczny moduł sprężystości poziomej podłoża ($C_{stat,b}$),
 - współczynnik strat (tłumienia) określane jako η = tangens kąta przesunięcia fazowego na osi czasu pomiędzy obciążeniem i odkształceniem. Współczynnik ten jest związany z istotną dla tłumienia cechą elastomerów, jaką jest tzw. przeszywnienie dynamiczne r określane relacją pomiędzy sztywnością dynamiczną i statyczną ($r = k_{dyn,z}/k_{stat,z}$ lub $r = C_{dyn,z}/C_{stat,z}$);
- B) trwałość (zdatność) eksploatacyjna wibroizolacji, tj. mechaniczna wytrzymałość zmęczeniowa, obejmująca zmiany statycznego pionowego modułu sprężystości podłoża $C_{stat,z1}$ lub sztywności pionowej statycznej $k_{stat,z1}$ wywołane obciążeniem dynamicznym symulującym w warunkach laboratoryjnych obciążenia eksploatacyjne (3 mln cykli obciążeń), a także wytrzymałość na długotrwałe ścinanie (określenie na podstawie badania zakresu zmiany pełzania ϕK , a także zakresu zmiany statycznego pionowego modułu sprężystości podłoża $C_{stat,z1}$ lub sztywności pionowej statycznej $k_{stat,z1}$ wywołanej długotrwałym obciążeniem ścinającym);
- C) ustalone cechy materiałowe maty, których wybór dokonywany przez Projektanta lub Inwestora powinien uwzględniać specyfikę warunków eksploatacyjnych związanych z konkretnym przeznaczeniem danego rodzaju maty wibroizolacyjnej. Badania cech materiałowych mogą obejmować następujące parametry opisane w normie [3]:
- mrozoodporność,
 - odporność na starzenie,
 - wodoodporność.

W pracy [5, tabl. 1] dokonano zestawienia, na podstawie wydanych aprobat technicznych dla mat wibroizolacyjnych różnych producentów, parametrów technicznych mat oraz norm, według których były określane ich wartości. Z zestawienia tego jednoznacznie wynika dowolność wyboru, brak jednolitych wymagań oraz metod określania tych parametrów, nawet przy uwzględnieniu różnic wynikających z różnych materiałów użytych do ich produkcji. W aprobatkach powszechnie przywoływane są właściwości nieistotne dla spełnienia zasadniczych wymagań funkcjonalnych. Podczas gdy wymagania odnośnie jednego wyrobu do takiego samego zastosowania, powinny być identyczne pod względem właściwości, procedur badawczych opisanych w odpowiednich normach, a także wartości parametrów granicznych warunkujących ich przydatność w określonych warunkach.

4. Wybrane zagadnienia badania istotnych dla eksploatacji właściwości funkcjonalnych mat wibroizolacyjnych podpłytowych stosowanych w systemach masy odsprężynowanej

Brak normy polskiej oraz europejskiej, która określałaby w sposób jednoznaczny wymagania i metodykę badań dla mat wibroizolacyjnych stosowanych w drogach szynowych powoduje, że zasadne jest stosowanie norm niemieckich DIN 45673-5 [2] i DIN 45673-7 [3]. Dokument DIN 45673-7 [3] powstał w celu określenia istotnych właściwości i wyznaczenia ich parametrów dla elementów sprężystych stosowanych w systemach masy odsprężynowanej, w celu weryfikacji przydatności danego rozwiązania do istniejących warunków, porównywania pomiędzy sobą różnych rozwiązań oraz aby umożliwić wymiarowanie tych systemów. Należy pamiętać, że systemy masy odsprężynowanej są zawsze rozwiązaniem zaprojektowanym dla konkretnych uwarunkowań, dlatego w normie nie są podane bezpośrednio konkretne zakresy obciążeń zadawanych podczas badań, jak ma to miejsce w przypadku badań dla mat podtłuczniowych opisanych w normie DIN 45673-5 [2]. Należy zwrócić jednak uwagę, że obecnie wydawane normy zwykle nie określają granicznych wartości parametrów, a jedynie procedury badawcze konkretnych właściwości. W dalszej części artykułu zostaną opisane wybrane procedury badawcze charakterystyczne dla mat wibroizolacyjnych podpłytowych stosowanych w konstrukcji dróg szynowych w systemach masy odsprężynowanej.

4.1. *Statyczny i dynamiczny moduł sprężystości podłoża oraz sztywność statyczna i dynamiczna*

Parametry te zasadniczo określają skuteczność tłumienia transmisji drgań do otoczenia. Dla mat wibroizolacyjnych mniej podatnych skuteczność ta będzie mniejsza niż dla mat o małych wartościach modułu podłoża sprężystego lub sztywności. Należy jednak pamiętać, że zastosowanie maty o bardzo małej wartości statycznego modułu sprężystości podłoża lub sztywności, skutkuje większym ugięciem pionowym szyny i nawierzchni szynowej, co z kolei powoduje większe amplitudy i naprężenia oraz zmniejsza wytrzymałość zmęczeniową, a tym samym trwałość eksploatacyjną konstrukcji drogi szynowej. Szybsze narastanie odkształceń zwiększa nakłady na utrzymanie toru. Warto dodać, że słowo *podłoże* w nazwie parametru traktowane jest tutaj w szerszym kontekście – nie jako *podłoże gruntowe*, a jako element pod konstrukcją nawierzchni szynowej. Wartość statycznego i dynamicznego modułu sprężystości podłoża jest określana w przypadku mat wibroizolacyjnych dla podparcia pasmowego oraz powierzchniowego i zawiera się w szerokim przedziale wartości od $\sim 0,003$ do $\sim 0,33$ N/mm³. Zależy ona m.in. od rodzaju i struktury materiału, grubości maty, wartości obciążenia w jakim określany jest moduł sprężystości podłoża oraz częstotliwości obciążeń w przypadku modułu dynamicznego. Natomiast dla elementów o określonych wymiarach, w przypadku podparcia punktowego wyznacza się wartość współczynnika sztywności statycznej i dynamicznej.

Określenie statycznych i dynamicznych właściwości systemu masy odsprężynowanej zgodnie z normą DIN 45673-7 [3] jest ograniczone tylko do elementów sprężystych. Ze względu na nieliniowe charakterystyki mat wibroizolacyjnych do badań właściwości tłumiących należy brać charakterystyki taboru (np. naciski osiowe), który rzeczywiście będzie się poruszał po danej linii w ramach regularnych kursów. Wartości te mogą się różnić względem stosowanych do wymiarowania konstrukcji drogi szynowej ze względu na wytrzymałość i bezpieczeństwo teoretycznych modeli obciążeń np. LM 71 [10].

4.1.1. Statyczny moduł sprężystości pionowej podłoża $C_{stat,z}$ oraz sztywność statyczna pionowa $k_{stat,z}$

Stacyjny moduł sprężystości pionowej podłoża jest stosunkiem statycznego nacisku o określonej wartości przyłożonego do próbki/elementu sprężystego o określonym polu przekroju (naprężenia) do ugięcia próbki, które ten nacisk powoduje. Parametr ten charakteryzuje warunki ugięcia toku szynowego pod naciskiem nieporuszającego się taboru i ma wpływ na ugięcie pionowe konstrukcji nawierzchni w systemie masy odsprężynowanej. Wielkość statycznego modułu sprężystości podłoża jest zależna od nacisku, nie jest to jednak zależność liniowa. Dlatego też jest ona określana dla różnych zakresów obciążeń w zależności od rozpatrywanego przeznaczenia zastosowania maty wibroizolacyjnej (patrz tab. 1).

Tabela 1. Zakresy obciążeń (siła ścisająca F przypadająca na jednostkę powierzchni próbki A ; $F = \sigma \times A$) stosowane przy wyznaczaniu statycznego modułu sprężystości podłoża

Rodzaje obciążeń	Sposób wyznaczania wartości obciążeń
σ_0 – obciążenie minimalne	obciążenie powierzchniowe od systemu masy odsprężynowanej z uwzględnieniem szyn i ich przytwierdzeń
σ_1 – obciążenie użytkowe	obciążenie minimalne σ_0 plus pionowe naciski od pojazdów szynowych rzeczywiście poruszających się po danej linii w ramach regularnych kursów σ_{pv} pomnożone przez wartość współczynnika dynamicznego Φ
σ_2 – obciążenie obliczeniowe	obciążenie minimalne σ_0 plus pionowe naciski od pojazdów szynowych referencyjnych σ_{pvB} pomnożone przez wartość współczynnika dynamicznego Φ lub obciążenie minimalne σ_0 plus pionowe naciski w modelach obciążeń używanych do sprawdzenia bezpieczeństwa konstrukcji drogi szynowej np. LM 71 pomnożone przez wartość współczynnika dynamicznego Φ
σ_3 – obciążenie maksymalne	1,35 x obciążenie minimalne σ_0 plus 1,5 x pionowe naciski od pojazdów szynowych referencyjnych σ_{pvB} pomnożone przez wartość współczynnika dynamicznego Φ lub 1,35 x obciążenie minimalne σ_0 plus 1,45 x pionowe naciski w modelach obciążeń używanych do sprawdzenia bezpieczeństwa konstrukcji drogi szynowej np. LM 71 pomnożone przez wartość współczynnika dynamicznego Φ

Uwaga: wartość współczynnika dynamicznego $\Phi = 1,3$ dla $V_{max} \leq 200$ km/h [3]

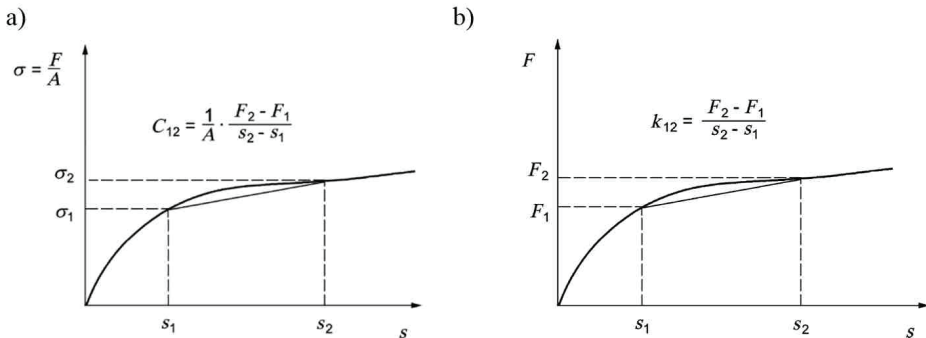
Do badania używane są trzy próbki o wymiarach 300 mm x 300 mm x grubość maty. Odbywa się ono w temperaturze $23 \pm 3^\circ\text{C}$ (jeśli badany materiał będzie używany na zewnątrz w temperaturze poniżej 0°C dodatkowo powinien zostać przebadany w temperaturze ujemnej), przy czym próbki powinny być suche i przechowywane w temperaturze badania na co najmniej 16 h przed jego rozpoczęciem. Obciążenie próbki odbywa się w następującym układzie: płaska stalowa płyta obciążająca – materiał o dużej szorstkości – próbka maty – materiał o dużej szorstkości – płaska płyta obciążająca. Badanie powinno odbywać się w trzech cyklach, bez przerw pomiędzy poszczególnymi cyklami. W każdym cyklu obciążenie powinno być zadane w następującej sekwencji: $0,001 \text{ N/mm}^2$ (tj. 90 N), σ_0 , σ_1 , σ_2 i σ_3 . Następnie następuje odciążenie, w którym wartość obciążenia maleje do zera. Fazy obciążania i odciążania próbki powinny odbywać się ze stałą w czasie zmianą prędkości obciążenia równą $0,01 \text{ (N/mm}^2\text{)/s}$ (tj. 0,9 kN/s). Trzeci cykl powinien zostać zarejestrowany w postaci wykresu: obciążenie (σ)/ugięcie (s). Bazując na zmierzonych ugięciach s statyczny moduł sprężystości podłoża powinien zostać obliczony w N/mm^3 jako moduł sieczny (rys. 5a) pomiędzy skrajnymi wartościami zakresu obciążeń, zgodnie ze wzorami 1, 2 i 3:

$$C_{stat,z1} = \frac{\sigma_1 - \sigma_0}{s_1 - s_0} \quad \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^3} \right] \quad (1)$$

$$C_{stat,z2} = \frac{\sigma_2 - 0,01 \text{ N/mm}^2}{s_2 - s_{0,01 \text{ N/mm}^2}} \quad \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^3} \right] \quad (2)$$

$$C_{stat,z3} = \frac{\sigma_2 - \sigma_0}{s_2 - s_0} \quad \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^3} \right] \quad (3)$$

Wartości statycznych modułów sprężystości podłoża obliczane są jako średnie arytmetyczne z wartości wyznaczonych dla każdej z trzech próbek na podstawie wzorów 1-3. Wartość $k_{stat,z1}$ jest wykorzystywana do obliczania odkształcenia, wartość $k_{stat,z2}$ do analizy statycznej, a wartość $k_{stat,z3}$ do analizy ugięć płyty systemu masy odsprężynowanej.



Rys. 5. a) Wykres obrazujący badanie statycznego modułu sprężystości podłoża, jako modułu siecznego pomiędzy skrajnymi wartościami zakresu obciążeń, b) Wykres obrazujący badanie sztywności statycznej jako sztywności siecznej pomiędzy skrajnymi wartościami zakresu obciążeń [1]

Sztywność statyczna pionowa jest stosunkiem statycznego nacisku o określonej wartości przyłożonego do próbki/elementu sprężystego o określonym polu przekroju do ugięcia próbki/elementu sprężystego, które ten nacisk powoduje. Wielkość sztywności statycznej podobnie jak wielkość statycznego modułu sprężystości podłoża jest zależna od nacisku w sposób nieliniowy. Dlatego też jest określana dla różnych zakresów obciążeń w zależności od rozpatrywanego przeznaczenia zastosowania maty wibroizolacyjnej (tab. 2).

Tabela 2. Zakresy obciążeń stosowane przy wyznaczaniu sztywności statycznej

Rodzaje obciążeń	Sposób wyznaczania wartości obciążeń
F_0 – obciążenie minimalne	obciążenie od systemu masy odsprężynowanej z uwzględnieniem szyn i ich przytwierdzeń oraz podsypki jeśli została zastosowana
F_1 – obciążenie użytkowe	obciążenie minimalne F_0 plus (pionowe naciski od pojazdów szynowych P_v uwzględniające pionowe składowe od przyspieszenia odśrodkowego na łukach poziomych F_{rt}) pomnożone przez wartość współczynnika dynamicznego Φ Uwaga: pionowe składowe od przyspieszenia odśrodkowego na łukach poziomych F_{FV} dla kolei miejskiej i głównych linii kolejowych można przyjmować jako $0,2 \times P_v$, ale ta wartość może być znacznie wyższa dla pojazdów niskopodłogowych
F_2 – obciążenie obliczeniowe	obciążenie minimalne F_0 plus pionowe naciski od pojazdów szynowych referencyjnych P_{vB} pomnożone przez wartość współczynnika dynamicznego Φ lub obciążenie minimalne F_0 plus pionowe naciski w modelach obciążeń używanych do sprawdzenia bezpieczeństwa konstrukcji drogi szynowej np. <i>LM 71</i> pomnożone przez wartość współczynnika dynamicznego Φ
F_3 – obciążenie maksymalne	$1,35 \times$ obciążenie minimalne F_0 plus $1,5 \times$ pionowe naciski od pojazdów szynowych referencyjnych P_{vB} pomnożone przez wartość współczynnika dynamicznego Φ lub $1,35 \times$ obciążenie minimalne F_0 plus $1,45 \times$ pionowe naciski w modelach obciążeń używanych do sprawdzenia bezpieczeństwa konstrukcji drogi szynowej np. <i>LM 71</i> pomnożone przez wartość współczynnika dynamicznego Φ

Uwaga: wartość współczynnika dynamicznego $\Phi = 1,3$ dla $V_{max} \leq 200$ km/h [3]

Do badania używane są trzy próbki/elementy sprężyste o wymiarach rzeczywistych. Badanie wykonuje się analogicznie jak badanie statycznego modułu sprężystości podłoża z pewnymi modyfikacjami dotyczącymi zakresu i prędkości zmiany obciążeń. W każdym cyklu obciążenie powinno być zadane w następującej sekwencji: 1 kN, F_0 , F_1 , F_2 i F_3 . Następnie następuje odciążenie w którym wartość obciążenia maleje do zera. Fazy obciążania i odciążania próbki powinny odbywać się ze stałą w czasie zmianą prędkości obciążenia równą 2 kN/s. Trzeci cykl powinien zostać zarejestrowany w postaci wykresu: obciążenie (F)/ugięcie (s). Bazując na zmierzonych ugięciach s sztywność statyczna powinna zostać obliczona w N/mm jako sztywność sieczna (rys. 5b) pomiędzy skrajnymi wartościami zakresu obciążeń zgodnie ze wzorami: 4,5 i 6:

$$k_{stat,z1} = \frac{F_1 - F_0}{s_1 - s_0} \quad \left[\frac{N}{m} \right] \quad (4)$$

$$k_{stat,z2} = \frac{F_2 - 1 \text{ kN}}{s_2 - s_1 \text{ kN}} \quad \left[\frac{N}{m} \right] \quad (5)$$

$$k_{stat,z3} = \frac{F_2 - F_0}{s_2 - s_0} \quad \left[\frac{N}{m} \right] \quad (6)$$

Wartości sztywności statycznych obliczane są jako średnie arytmetyczne z wartości wyznaczonych dla każdej z trzech próbek na podstawie wzorów 4-6. Wartość jest wykorzystywana do obliczania odkształcenia, wartość do analizy statycznej, a wartość do analizy ugięć płyty systemu masy odsprężynowanej.

4.1.2. Dynamiczny moduł sprężystości pionowej podłoża $C_{dyn(f)}$ i sztywność dynamiczna pionowa $k_{dyn(f)}$

Dynamiczny moduł sprężystości pionowej podłoża jest stosunkiem dynamicznego nacisku o określonej wartości i częstotliwości przyłożonego do próbki o określonym polu przekroju (naprężenia) do ugięcia próbki, które ten nacisk powoduje. Parametr ten charakteryzuje zatem pracę maty wibroizolacyjnej pod naciskiem poruszającego się taboru, czyli determinuje zapewniane przez nią ograniczenia transmisji drgań przez system masy odsprężynowanej. Wartość dynamicznego modułu sprężystości podłoża jest zależna nie tylko od nacisku, jak w przypadku statycznego modułu sprężystości podłoża, ale również od częstotliwości, dlatego też powinna być wyznaczana w warunkach znormalizowanej częstotliwości. Wartość dynamicznego modułu sprężystości podłoża $C_{dyn(f)}$ ma wpływ na częstotliwość drgań własnych układu w postaci systemu masy odsprężynowanej i służy do jej wyznaczenia.

Wymiary próbki do badania dynamicznego modułu sprężystości podłoża oraz sposób jej obciążenia i przygotowania są takie same jak przy badaniu statycznego modułu sprężystości podłoża. Badanie przeprowadza się dla częstotliwości: 5, 10, 20 i 30 Hz. Przy określaniu dynamicznego modułu sprężystości podłoża próbka jest obciążana dynamicznie w stanie wstępnego, statycznego obciążenia zmienianego trzystopniowo o wartościach σ_{v1} , σ_{v2} i σ_{v3} , których sposób wyznaczania podano w tab. 3. Po zastosowaniu obciążenia wstępnego badany element poddawany jest obciążeniu harmonicznemu dla każdej z czterech częstotliwości, tak aby względny ruch pomiędzy dwoma płytami obciążającymi wykazywał prędkość zmian amplitudy 7 mm/s. Pomiar wartości sił i przemieszczeń oraz obliczenie wartości sztywności dynamicznej $k_{dyn(f)}$ wykonuje się zgodnie z normą PN-EN ISO 10846-2 [9], która nie dotyczy tylko mat wibroizolacyjnych, ale może być również zastosowana do omawianego zakresu badań. Wartość dynamicznego modułu sprężystości podłoża $C_{dyn(f)}$ jest wynikiem podzielenia wartości sztywności dynamicznej

$k_{dyn(f)}$ przez wartość pola przekroju próbki. Dla każdej częstotliwości należy wyznaczyć wartość dynamicznego modułu sprężystości podłoża jako wartość średnią z wyników badań dla trzech próbek.

Tabela 3. Zakresy obciążeń wstępnych stosowane przy wyznaczaniu dynamicznego modułu sprężystości podłoża

Rodzaje obciążeń wstępnych	Sposób wyznaczenia
$\sigma_{v,1}$ - ciężar własny systemu masy odsprężynowanej z uwzględnieniem szyn i ich przytwierdzeń oraz podsypki jeśli została zastosowana	$\sigma_{v,1} = \sigma_0$
$\sigma_{v,2}$ - ciężar własny plus połowa nacisków pionowych od pojazdów	$\sigma_{v,2} = \sigma_0 + \frac{\sigma_{pV}}{2} \cdot \Phi$
$\sigma_{v,3}$ - ciężar własny plus naciski pionowe od pojazdów	$\sigma_{v,3} = \sigma_0 + \sigma_{pV} \cdot \Phi$

Uwaga: wartość współczynnika dynamicznego $\Phi = 1,3$ dla $V_{max} \leq 200$ km/h [3]

Wynik badania dla obciążenia wstępnego $\sigma_{v,1}$ jest stosowany do wyznaczenia częstotliwości drgań własnych układu, a dla obciążenia wstępnego $\sigma_{v,2}$ do wyznaczenia współczynnika przeszywnienia dynamicznego. Wartość dynamicznego modułu sprężystości podłoża wyznaczona dla obciążenia wstępnego $\sigma_{v,2}$ lub $\sigma_{v,3}$ jest stosowana do wyznaczenia wartości tłumienności dodanej (D_d).

Sztywność dynamiczna pionowa jest stosunkiem dynamicznego nacisku o określonej wartości i częstotliwości przyłożonego do próbki/elementu sprężystego do ugięcia próbki/elementu, które jest powodowane przez ten nacisk. Wartość sztywności dynamicznej jest zależna nie tylko od nacisku, jak w przypadku sztywności statycznej, ale również od częstotliwości, podobnie jak wartość dynamicznego modułu sprężystości podłoża, dlatego też powinna być wyznaczana w warunkach znormalizowanej częstotliwości. Wartość sztywności dynamicznej $k_{dyn(f)}$, podobnie jak wartość dynamicznego modułu sprężystości podłoża ma wpływ na częstotliwość drgań własnych układu w postaci systemu masy odsprężynowanej i służy do jej wyznaczania.

Wymiary próbki do badania sztywności dynamicznej oraz sposób jej obciążenia i przygotowania są takie same jak przy badaniu sztywności statycznej. Badanie przeprowadza się dla częstotliwości: 5, 10 i 20 Hz. Przy określaniu sztywności dynamicznej próbka jest obciążana dynamicznie w stanie wstępnego, statycznego obciążenia zmienianego trzystopniowo o wartościach F_{v1} , F_{v2} i F_{v3} , których sposób wyznaczania podano w tab. 4. Pomiary wartości sił i przemieszczeń oraz obliczenie wartości sztywności dynamicznej $k_{dyn(f)}$ wykonuje się zgodnie z normą PN-EN ISO 10846-2 [9]. Dla każdej częstotliwości należy wyznaczyć wartość sztywności dynamicznej jako wartość średnia z wyników badań dla trzech próbek.

Tabela 4. Zakresy obciążeń wstępnych stosowane przy wyznaczaniu sztywności dynamicznej

Rodzaje obciążeń wstępnych	Sposób wyznaczenia
$F_{v,1}$ - ciężar własny systemu masy odsprężynowanej z uwzględnieniem szyn i ich przytwierdzeń oraz podsypki jeśli została zastosowana	$F_{v,1} = F$
$F_{v,2}$ - ciężar własny plus połowa nacisków pionowych od pojazdów	$F_{v,2} = F_0 + \frac{F_{pV}}{2} \cdot \Phi$
$F_{v,3}$ - ciężar własny plus naciski pionowe od pojazdów	$F_{v,3} = F_0 + F_{pV} \cdot \Phi$

Uwaga: wartość współczynnika dynamicznego $\Phi = 1,3$ dla $V_{max} \leq 200$ km/h {3}

Wynik badania dla obciążenia wstępnego $F_{v,1}$ jest stosowany do wyznaczenia częstotliwości drgań własnych układu, a dla obciążenia wstępnego $F_{v,2}$ do wyznaczenia współczynnika przeszywnienia dynamicznego. Wartość sztywności dynamicznej wyznaczonej dla obciążenia wstępnego $F_{v,2}$ lub $F_{v,3}$ jest stosowana do wyznaczenia wartości tłumienności dodanej (D).

4.2. Współczynnik przeszywnienia dynamicznego $r(f)$

Współczynnik przeszywnienia dynamicznego określany jako stosunek dynamicznej do statycznej wartości modułu sprężystości podłoża lub sztywności dynamicznej do statycznej jest prostym do określenia wskaźnikiem charakteryzującym możliwość osiągania skutecznego tłumienia drgań materiałowych przez maty wibroizolacyjne. Ze względu na znaną właściwość elastomerów, polegającą na znaczącym wpływie częstotliwości ich obciążenia dynamicznego na wartość wywołanego przez nie odkształcenia (tj. na sztywność lub na moduł sprężystości podłoża) określany on jest oddzielnie dla różnych częstotliwości. Moduł przeszywnienia dynamicznego jest określany wg wzoru 7, a jego wartość im bliższa jest 1 (dla wartości $r(f) > 1$), tym lepsze właściwości wibroizolacyjne wykazuje badany element (np. mata podpłytowa).

$$r(f) = \frac{C_{dyn}(f)}{C_{stat}} \quad [1] \quad (7)$$

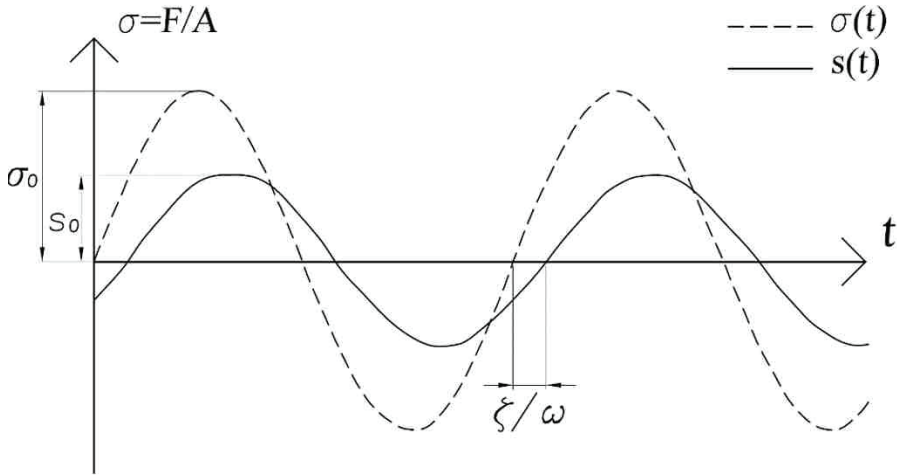
4.3. Współczynnik strat (tłumienia) η

Współczynnik strat (tłumienia) η określany jako tangens kąta (ζ) przesunięcia fazowego na osi czasu pomiędzy obciążeniem i odkształceniem (rys. 6). Wartość współczynnika strat jest jedną z miar tłumienia energii emitowanej z obiektu wzbudzonego do drgań (np. szyny lub innego elementu nawierzchni szynowej) do jego otoczenia (np. do podtorza). Określa on stosunek wartości energii rozproszonej do wartości energii obciążenia w przypadku obciążenia quasi-statycznego lub harmonicznego. Im większa jest wartość współczynnika tłumienia η tym mata jest lepszym izolatorem wibroakustycznym. Współczynnik strat (tłumienia) η określa się wg wzoru 8, a zależności pomiędzy obciążeniem a odkształceniem (ugięciem) opisują wzory 9 i 10:

$$\eta = tg(\zeta) \quad [1] \quad (8)$$

$$\sigma(t) = \sigma_0 \sin(\omega t) \quad \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad (9)$$

$$s(t) = s_0 \sin(\omega t - \zeta) \quad [mm] \quad (10)$$



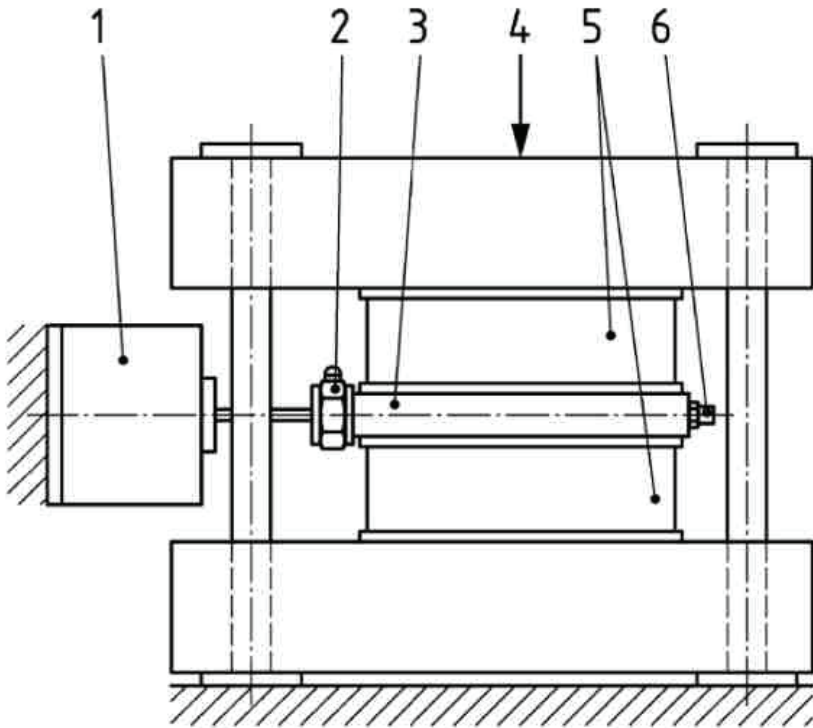
Rys. 6. Graficzna interpretacja kąta (ζ) przesunięcia fazowego na osi czasu pomiędzy obciążeniem ($\sigma = F/A$) i odkształceniem (ugięciem s)

Miarą tłumienia jest również współczynnik tłumienia dodanego (D_d) określane- go w uproszczeniu jako różnica poziomów drgań w układzie konstrukcyjnym (np. drogi szynowej) bez elementu wibroizolacyjnego i z takim elementem (np. z matą wibroizolacyjną). Im większa jest wartość współczynnika tłumienia dodanego (D_d), tym układ konstrukcyjny z elementami wibroizolacji (np. z matą) skuteczniej tłum- mi wibracje od ruchu pojazdów szynowych [15 - 19].

4.4. Statyczny moduł sprężystości poziomej podłoża $C_{stat,h}$ i sztywność statyczna pozioma $k_{stat,h}$

Siły poziome przenoszone od kół na szyny (np. podczas hamowania pociągu, wskutek działania przyspieszenia odśrodkowego) powodują powstawanie sił ścina- jących w podporach koryta lub płyty podbudowy systemu masy odsprężynowanej. Wartości tych sił są zdecydowanie większe w przypadku podparcia punktowego i pa- smowego, niż w przypadku podparcia powierzchniowego, gdyż uzależnione są od pola powierzchni podparcia. Badania statycznego modułu sprężystości poziomej oraz sztywności poziomej przeprowadza się dla obydwu poziomych kierunków głównych.

Dla mat wibroizolacyjnych, które stosuje się w systemach masy odsprężynowanej oprócz podstawowych badań właściwości dynamicznych przedstawionych wcześniej (pkt. 4.1 - 4.3) dodatkowo należy wyznaczyć statyczny moduł sprężystości poziomej podłoża $C_{stat,b}$ lub sztywność statyczną poziomą $k_{stat,b}$. Badanie to wykonuje się w celu oszacowania rozpraszania oddziaływań dynamicznych w kierunku podłużnym (np. od hamowania pociągów poruszających się z dużymi prędkościami) i poprzecznym toru (np. siła odśrodkowa; składowa od przyspieszenia grawitacyjnego na odcinku toru w łuku poziomym z przechyłką; od wężykowania składu). Przeprowadza się je w warunkach analogicznych, jak badania statycznego modułu sprężystości podłoża lub sztywności statycznej, z tą różnicą, że materiał o dużej szorstkości jest dodatkowo przyklejony do płaskiej stalowej płyty obciążającej, aby zapobiec poślizgowi w trakcie badania. W przypadku badania materiałów anizotropowych badanie przeprowadza się w obu poziomych kierunkach głównych. Na próbkę obciążoną początkową pionową siłą ścisającą $F_v = F_0$ (jak w badaniu sztywności statycznej – p.4.1.1) należy dodatkowo przyłożyć obciążenie poziome (patrz. rys. 7) o wartościach zgodnie z tab. 5.



Rys. 7. Schemat aparatury do badania sztywności statycznej poziomej {3}

Oznaczenia: 1 – silownik, 2 – miernik siły, 3 – płyta dystrybuująca obciążenie poziome, 4 – przyłożenie siły pionowej F_v o stałej wartości za pomocą płyty obciążeniowej, 5 – próbka/element sprężysty, 6 – miernik odkształcenia

Tabela 5. Zakresy obciążeń poziomych stosowane przy wyznaczaniu sztywności statycznej poziomej [3]

Rodzaje obciążeń	Sposób wyznaczania wartości obciążeń
F_{h0} – obciążenie minimalne	obciążenie poziome będące wypadkową od składowej od obciążenia grawitacyjnego i składowej od obciążenia odśrodkowego działających w płaszczyźnie równoległej do płaszczyzny
F_{h1} – obciążenie użytkowe	obciążenie minimalne F_{h0} plus poziome siły P_{H} generowane przez pojazdy szynowe, które będą się poruszać po danej linii w sposób regularny
F_{h2} – obciążenie obliczeniowe	obciążenie minimalne F_0 plus poziome siły P_{HB} generowane przez pojazdy szynowe referencyjne lub obciążenie minimalne F_0 plus poziome siły w modelach obciążeń używanych do sprawdzenia bezpieczeństwa konstrukcji drogi szynowej np. LM 71
F_{h3} – obciążenie maksymalne	1,35 x obciążenie minimalne F_0 plus 1,5 x poziome siły P_{HB} generowane przez pojazdy szynowe referencyjne lub 1,35 x obciążenie minimalne F_0 plus 1,45 x poziome siły w modelach obciążeń używanych do sprawdzenia bezpieczeństwa konstrukcji drogi szynowej np. LM 71

Badanie sztywności statycznej poziomej powinno zostać przeprowadzone analogicznie jak badanie sztywności statycznej (pkt. 4.1.1; wzory 4 i 6), z tą różnicą, że obciążenie powinno wzrosnąć do maksymalnego w czasie 20 s. Następnie wyznacza się statyczne sztywności poziome $k_{stat,h1}$ i $k_{stat,h2}$.

Badanie statycznego modułu sprężystości poziomej podłoża wykonuje się analogicznie jak badanie sztywności statycznej poziomej, z tą różnicą, że wykorzystuje się próbkę o wymiarach jak do badania statycznego modułu sprężystości podłoża (tzn. 300 mm x 300 mm x rzeczywista grubość).

4.5. Trwałość eksploatacyjna mat wibroizolacyjnych

Trwałość (zdatność) eksploatacyjną mat wibroizolacyjnych ocenia się poprzez badanie ich mechanicznej wytrzymałości zmęczeniowej i wpływu długotrwałych obciążeń dynamicznych na zmienność ustalonych parametrów. Badanie to polega na obciążeniu dynamicznym próbki/elementu sprężystego symulującym w warunkach laboratoryjnych obciążenia eksploatacyjne. Sposób przeprowadzenia badania jest podany w tab. 6 według normy DIN 45673-7[3]. Pozytywna ocena zdatności eksploatacyjnej badanej maty obejmuje określenie na podstawie badania zakresu zmiany statycznego modułu sprężystości pionowej podłoża $C_{stat,z1}$ lub sztywności statycznej pionowej $k_{stat,z1}$ wywołanej obciążeniem dynamicznym, której wartość powinna realnie wynosić do 20% [3]. Zmianę tę wyznacza się procentowo poprzez porównanie wartości statycznego modułu sprężystości podłoża lub sztywności statycznej przed i po badaniu zmęczeniowym (próbki po badaniu zmęczeniowym należy schłodzić do temp. $23 \pm 3^\circ\text{C}$ i w niej wyznaczyć wartości statycznego modułu sprężystości podłoża lub sztywności statycznej). Ocena trwałości eksploatacyjnej maty wibroizolacyjnej, oceniana na podstawie jej wytrzymałości zmęczeniowej określanej poprzez zmianę statycznego modułu sprężystości podłoża lub sztywno-

ści statycznej w funkcji przeniesionego obciążenia, ma przełożenie na spadek skuteczności właściwości tłumiących maty. Mając na uwadze nawierzchnię w systemie masy odsprężynowanej wymiana maty wiązałaby się z naprawą główną. Dlatego tak istotna jest ta właściwość dla Zarządców infrastruktury, którzy nie mogą sobie pozwolić na to, aby trwałość maty odbiegała od trwałości pozostałych elementów nawierzchni. Przy doborze maty w trakcie projektowania konstrukcji drogi sztywnej w systemie masy odsprężynowanej należy brać pod uwagę wytrzymałość zmęczeniową oferowanego wyrobu. Nawet jeśli pozostałe właściwości maty są zadowalające, to niespełnienie wymagania dotyczącego wytrzymałości zmęczeniowej może spowodować, że w trakcie eksploatacji wartości modułów sprężystości podłoża lub sztywności statycznej będą stosunkowo szybko wzrastać, co negatywnie wpłynie na spełnianie podstawowej funkcji maty, jaką jest wibroizolacja.

Tabela 6. Sposób przeprowadzenia badania wytrzymałości zmęczeniowej maty wibroizolacyjnej (3)

Wymiary próbek	Podparcie punktowe	Podparcie pasmowe i powierzchniowe
	rzeczywisty wymiar elementu	300 mm x 300 mm x rzeczywista grubość (w przypadku podparcia powierzchniowego) 300 mm x rzeczywista szerokość x rzeczywista grubość (w przypadku podparcia pasmowego)
Sztywność statyczna lub statyczny moduł sprężystości podłoża	$k_{stat,z1}$ (patrz p. 4.1.1)	$C_{stat,z1}$ (patrz p. 4.1.1)
Dolna granica wartości obciążenia dynamicznego	F_0	σ_0
Górna granica wartości obciążenia dynamicznego	F_1	σ_1
Częstotliwość obciążeń	Jak największa uwzględniając warunek nie przekroczenia wartości granicznej temperatury próbki/elementu sprężystego wynoszącej 40°C. Badanie wytrzymałości zmęczeniowej powinno odbywać się zasadniczo w temp. 23 ± 3°C, ale w trakcie badania próbka/element sprężysty może się nagrzewać i aby nie dopuścić do przekroczenia wartości temp. 40°C, należy obniżyć częstotliwość lub chłodzić próbkę w trakcie badania.	
Liczba cykli obciążeń	3 mln	
Liczba próbek	1	
Powierzchnia zadająca obciążenie	Obciążenie próbki odbywa się w następującym układzie: płaska stalowa płyta obciążająca – materiał o dużej szorstkości – próbka/element sprężysty – materiał o dużej szorstkości – płaska płyta obciążająca	

4.6. Wytrzymałość na długotrwałe ścinanie

W celu zapewnienia odpowiedniej wartości wytrzymałości na długotrwałe ścinanie dla mat wibroizolacyjnych podpłytowych stanowiących podpory dla konstrukcji nawierzchni w systemach masy odsprężynowanej należy zbadać zmianę grubości/kształtu podpór pod wpływem długoterminowego obciążenia ścinającego oraz zmianę sztywności statycznej pionowej $k_{stat,z1}$ lub statycznego modułu sprężystości pionowej podłoża $C_{stat,z1}$. Wymiary próbek do badań oraz pionowe obciążenia wstępne przyjmuje się takie same jak w badaniu sztywności statycznej lub statycz-

nego modułu sprężystości podłoża. Czas trwania poziomego obciążenia ścinającego, o wartościach jak w badaniu sztywności statycznej poziomej lub statycznego modułu sprężystości poziomej podłoża, wynosi 168 godz. (7 dni). Po tym czasie wyznacza się zakres pełzania φ_K na podstawie wzoru 11:

$$\varphi_K = \frac{t_1 - t_2}{t_0 - t_1} \cdot 100 \quad [\%] \quad (11)$$

gdzie:

- t_0 – grubość podpory (próbki/elementu sprężystego) bez obciążenia,
- t_1 – grubość podpory (próbki/elementu sprężystego) po 5 min. od obciążenia,
- t_2 – grubość podpory (próbki/elementu sprężystego) po 168 godz. (7 dniach) od obciążenia.

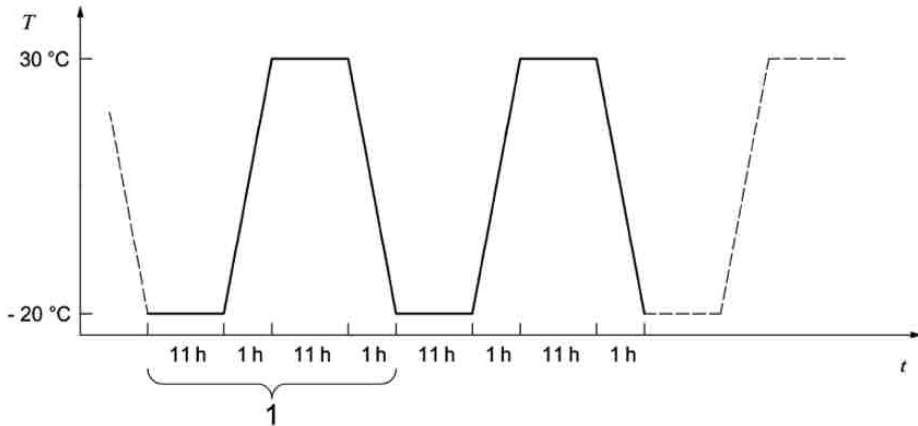
Pozytywna ocena zdolności eksploatacyjnej badanej maty wibroizolacyjnej pod płytowej ze względu na jej wytrzymałość na długotrwałe ścinanie, obejmuje określenie na podstawie badania zakresu zmiany pełzania φ_K , a także zakresu zmiany statycznego modułu sprężystości pionowej podłoża $C_{stat,z1}$ lub sztywności statycznej pionowej $k_{stat,z1}$ wywołanej obciążeniem ścinającym, których wartości powinny realnie wynosić do 20% [3].

4.7. Mrozoodporność

Ze względu na klimat i związane z nim temperatury występujące w Polsce badanie mat wibroizolacyjnych pod płytowych pod kątem ich mrozoodporności jest jak najbardziej uzasadnione. Utrzymująca się przez co najmniej dwa tygodnie w okresie zimowym temperatura poniżej -20°C i ciągle oscylowanie w okolicy 0°C nie są w naszym kraju rzadkością.

Badanie mrozoodporności opisane w normie DIN 45673-7[3] wykonywane jest na jednej próbce o wymiarach identycznych jak w badaniu sztywności statycznej (rzeczywisty wymiar elementu) lub statycznego modułu sprężystości podłoża (300 mm x 300 mm x grubość maty dla podparcia powierzchniowego lub 300 mm x szerokość maty x grubość maty dla podparcia pasmowego). Przed przystąpieniem do badania należy wyznaczyć sztywność dynamiczną $k_{dyn(f)}$ lub dynamiczny moduł sprężystości podłoża $C_{dyn(f)}$ dla próbki suchej w temperaturze pokojowej. Następnie próbka jest zanurzana na 24 godziny w wodzie destylowanej o temperaturze pokojowej. Przez pierwsze dwie godziny zanurzenia próbkę należy poddać cyklicznemu obciążeniu za pomocą płyty obciążeniowej. Wartość obciążenia powinna mieścić się w zakresach identycznych jak w badaniu wytrzymałości zmęczeniowej (od F_0 do F_1 lub od σ_0 do σ_1), przy częstotliwości 0,5 Hz. Następnie do próbki znajdującej się jeszcze w wodzie przykładana się obciążenie wstępne (F_0 lub σ_0) za pomocą dwóch płaskich stalowych płyt i umieszcza ją w komorze klimatycznej (z kontrolowaną temperaturą) w temperaturze -20°C na 11 godzin. Po 11 godzinach zamrażania próbka jest rozmrażana poprzez podnoszenie temperatury do 30°C przez 1 godzinę i pozostawiana w takiej temperaturze przez 11 godzin.

Później temperatura jest po raz kolejny obniżana do wartości -20°C przez 1 godzinę i próbka jest pozostawiona w takiej temperaturze na 11 godzin (patrz rys. 8). Czynności te należy powtórzyć 50 razy. Po zakończeniu 50 cykli należy wyznaczyć sztywność dynamiczną lub dynamiczny moduł sprężystości podłoża na wysuszonej próbce w temperaturze pokojowej i porównać z tym, który został określony przed badaniem. Dodatkowo należy ocenić próbkę wizualnie i stwierdzić, czy nie ma na niej pęknięć lub wybrzuszeń. Wyznacznikiem mrozoodporności maty jest procentowa zmiana wartości sztywności dynamicznej lub dynamicznego modułu sprężystości podłoża przed i po badaniu (im mniejsza tym lepiej).



Rys. 8. Wykres pokazujący cykle zmian temperatury dla badania mrozoodporności maty wibroizolacyjnej pod płytowej

Oznaczenia: T – temperatura, t – czas, 1 – jeden pełny cykl (3)

4.8. Odporność na starzenie

W czasie eksploatacji materiały - zwłaszcza tworzywa sztuczne, do których należą elastomery - zmieniają swoje właściwości. Proces ten nazywany jest starzeniem się materiału. Jest to szczególnie istotne w przypadku materiałów narażonych na niekorzystne działanie zewnętrznych czynników atmosferycznych. W przypadku mat wibroizolacyjnych pod płytowych z elastomerów stosowanych w systemach masy odsprężynowanej starzenie się materiału wskutek zmiennych obciążeń termicznych może niekorzystnie wpływać na ich właściwości użytkowe. Ze względu na długotrwałość badań odporności na czynniki atmosferyczne w warunkach naturalnych, stosuje się metody przyspieszonego starzenia w warunkach laboratoryjnych. Zgodnie z normami DIN 45673-7 [3] oraz ISO 188 [4] badana próbka powinna zostać umieszczona w komorze grzewczej z wymuszonym obiegiem powietrza i stałym dopływem świeżego powietrza przez 168 godzin (7 dni) w temperaturze $70 \pm 1^{\circ}\text{C}$. Należy wyznaczyć sztywność statyczną k_{stat} lub statyczny moduł sprężystości podłoża C_{stat} dla danej próbki zarówno przed badaniem odporności na starzenie jak i po, zgodnie z wcześniej opisaną procedurą. Oprócz

oceny zmian tego parametru określana jest procentowa zmiana masy, obliczana na podstawie uśrednionych wyników ważenia próbki przed i po procesie przyspieszonego starzenia, a także procentowa zmiana odkształcenia trwałego po ścisnieniu, którego wartości wyznaczanie są zgodnie z normami PN-ISO 815 [12] lub PN-EN ISO 1856[8], w zależności od materiału z którego wykonana jest mata. Wyznacznikiem odporności na starzenie maty jest procentowa zmiana wartości sztywności statycznej lub statycznego modułu sprężystości podłoża przed i po badaniu (im mniejsza tym lepiej).

4.9. *Wodoodporność i nasiąkliwość*

Kolejną istotną właściwością jest odporność mat na działanie wody, ponieważ ma ona duże znaczenie w przypadku mat wibroizolacyjnych pod płytowych stosowanych w systemach masy odsprężynowanej, ze względu na możliwość przenikania wód opadowych pod płytę torową (w przypadku rozwiązań na rys. 3 i 4 – tylko z powodu nieuszczelnności wynikających z błędów wykonania) i związany z tym destrukcyjny wpływ wody na materiał, z którego wykonana jest mata. Badanie polega na poddaniu próbki maty (w badaniu wykorzystuje się co najmniej trzy próbki; w przypadku materiałów anizotropowych po trzy na kierunek główny) suszeniu w temperaturze 30°C przez 168 godzin (7 dni), a następnie zanurzeniu jej w wodzie destylowanej o temperaturze 50°C na kolejne 168 godzin (7 dni). Sprawdzenie odporności maty na wodę określa się poprzez sprawdzenie wytrzymałości na rozciąganie oraz badanie zmienności wydłużenia przy zerwaniu, przed nasiąknięciem i po nim. Określenie wytrzymałości na rozciąganie oraz wydłużenia przy zerwaniu powinno być wykonane zgodnie z normami PN-ISO 37 [11] lub PN-EN ISO 1798 [7], w zależności od materiału z którego wykonana jest mata. Wyznacznikiem odporności na działanie wody dla maty są procentowe zmiany wytrzymałości na rozciąganie oraz zmiany wydłużenia przy zerwaniu przed i po badaniu, wyznaczone jako wartości średnie z trzech próbek (im mniejsze tym lepiej).

W normie DIN 45673-7[3] opisana jest metoda badań jeszcze jednej właściwości, a mianowicie zdolności maty wibroizolacyjnej (badana tylko w przypadku podparcia powierzchniowego) do absorpcji wody, czyli wykazywanie określonej nasiąkliwości. Nasiąkliwość jest zdolnością materiału do wchłaniania wody. Wyróżnia się nasiąkliwość wagową, która określa procentowy stosunek masy wody wchłoniętej przez dany materiał do jego masy w stanie suchym oraz nasiąkliwość objętościową, czyli procentowy stosunek masy wody wchłoniętej przez materiał do objętości tego materiału w stanie suchym. Właściwość ta jest szczególnie podkreślana przez niektórych producentów mat wibroizolacyjnych jako bardzo istotna dla jakościowej oceny mat. Argumentują to tym, że maty wibroizolacyjne są narażone na działanie wody opadowej i przez to mogą wykazywać duże zmiany modułu sprężystości podłoża związanego podobno z nasiąkliwością. Ta intuicyjnie oceniana i prawdopodobna zależność nie znajduje jednak potwierdzenia w wynikach badań, co uzasadnia zakwalifikowanie omawianej zależności jako nieistotnej dla eksploatacji drogi szynowej. Opinia ta uwzględnia również fakt, że normo-

wa metodyka badań nasiąkliwości zdecydowanie odbiega od realnych warunków oddziaływania wody na matę, jakie występują w eksploatacji, bowiem podczas badania mamy do czynienia z wymuszoną absorpcją wody, która z zasady będzie znacznie większa niż w przypadku naturalnej absorpcji wody opadowej w torze z konstrukcją nawierzchni w systemie masy odsprężynowanej. W niektórych aprobatkach (tab.5,[1]) podane są wartości nasiąkliwości, bez określenia jej wpływu na wartość statycznego i dynamicznego modułu sprężystości podłoża, a więc wpływu na istotne właściwości użytkowe maty. Wyniki badań przeprowadzonych w Niemczech na Uniwersytecie Technicznym w Monachium [14] pokazują, że maty poliuretanowe o nasiąkliwości wynoszącej ok. 35% wykazują tylko nieznaczną zmianę dynamicznego modułu sprężystości podłoża (8% dla częstotliwości 5 i 10 Hz i 5% dla częstotliwości 20 i 30 Hz). Standardowo badanie nasiąkliwości materiału polega na moczeniu próbki w wodzie przez 192 godziny (8 dni) w temperaturze 23°C, gdzie po 24, 48, 96 i 192 godzinach dokonuje się ważenia próbki. Badanie to opisuje Polska Norma PN-EN ISO 62 [6]. Jednak procedura badania nasiąkliwości opisana w normie DIN 45673-7[3], dedykowana specjalnie dla mat wibroizolacyjnych podpłytowych w przypadku podparcia powierzchniowego, jest inna. W przypadku tej procedury badawczej próbka maty zanurzona jest w wodzie o temperaturze $23 \pm 3^{\circ}\text{C}$ przez 24 godziny, gdzie przez pierwsze dwie godziny zanurzenia próbka poddawana jest cyklicznemu obciążeniu za pomocą płyty obciążeniowej. Wartość obciążenia powinna mieścić się w zakresach identycznych jak w badaniu wytrzymałości zmęczeniowej (od σ_0 do σ_1), przy częstotliwości 0,5 Hz. W celu uniemożliwienia próbce maty swobodnego unoszenia się na wodzie próbka jest obciążana szklaną płytą. Nasiąkliwość zostaje wyrażona w procentach poprzez porównanie masy badanej próbki przed i po zanurzeniu, podając tę różnicę jako procentowy wzrost w odniesieniu do próbki w stanie suchym.

5. Wnioski

- 1) Należy w sposób oficjalny ustalić podstawowe wymagania dla wyrobów i systemów stosowanych do izolacji wibroakustycznej i elektrycznej w konstrukcjach dróg szynowych, najistotniejszych z punktu widzenia ich zasadniczych funkcji spełnianych w konstrukcji dróg szynowych – tzn. z uwagi na skuteczność tłumienia wibracji i hałasu wtórnego oraz trwałość eksploatacyjną torowiska.
- 2) Opracowywane dokumentacje projektowe i przetargowe, a także aprobaty techniczne powinny uwzględniać tylko istotne cechy techniczne i użytkowe wyrobu z wykorzystaniem przede wszystkim Polskich Norm, ewentualnie norm państw Europejskiego Obszaru Gospodarczego – w przypadku mat wibroizolacyjnych podpłytowych stosowanych w systemach masy odsprężynowanej powinna być to norma niemiecka DIN 45673-7 [3] lub opracowana z jej uwzględnieniem norma europejska, której ustanowienie jest

oczekiwanym uregulowaniem dotyczącym m.in. jednolitych wymagań, jakie powinny spełniać maty wibroizolacyjne.

- 3) Za wykaz parametrów charakteryzujących najbardziej istotne cechy badane dla oceny jakościowej mat wibroizolacyjnych stosowanych w systemach masy odsprężynowanej należy uznać takie parametry, jak:
- A. moduły sprężystości pionowej podłożastatyczny ($C_{stat,z}$) i dynamiczny ($C_{dyn,z}$) lub pionowa sztywność statyczna ($k_{stat,z}$) i dynamiczna ($k_{dyn,z}$) oraz obliczany na ich podstawie wskaźnik przeszywnienia dynamicznego $r = C_{dyn,z} / C_{stat,z}$ lub $r = k_{dyn,z} / k_{stat,z}$, którego wartość powinna być możliwie bliska 1; a także możliwie wysoka wartość współczynnika tłumienia dodanego (D_e) oraz współczynnika strat (tłumienia) określanego jako $\eta = \text{tangens kąta przesunięcia fazowego na osi czasu pomiędzy obciążeniem i odkształceniem}$;
 - B. trwałość (zdatność) eksploatacyjna wibroizolacji, tj. mechaniczna wytrzymałość zmęczeniowa obejmująca zmiany statycznego pionowego modułu sprężystości podłoża $C_{stat,z1i}$ wywołane obciążeniem dynamicznym symulującym w warunkach laboratoryjnych obciążenia eksploatacyjne (3 mln cykli obciążeń), a także wytrzymałość na długotrwałe ścinanie (określenie na podstawie badania zakresu zmiany pełzania φ_k , a także zakresu zmiany statycznego modułu sprężystości pionowej podłoża $C_{stat,z1}$ lub sztywności statycznej pionowej $k_{stat,z1}$ wywołanej długotrwałym obciążeniem ścinającym);
 - C. cechy materiałowe matyustalone, których wybór dokonywany przez Projektanta lub Inwestora powinien uwzględniać specyfikę warunków eksploatacyjnych związanych z konkretnym przeznaczeniem danego rodzaju maty wibroizolacyjnej. Badania cech materiałowych powinny obejmować następujące parametry:
 - mrozoodporność,
 - odporność na starzenie,
 - wodoodporność.

Bibliografia

- [1] DIN 45673-1:2010-08 Mechanical vibration. Resilient elements used in railway tracks. Part 1: Terms and definitions, classification, test procedures.
- [2] DIN 45673-5:2010-08 Mechanical vibration. Resilient elements used in railway tracks. Part 5: Laboratory test procedures for under-ballast mats.
- [3] DIN 45673-7:2010-08 Mechanical vibration - Resilient elements used in railway tracks - Part 7: Laboratory test procedures for resilient elements of floating slab track systems.

- [4] ISO 188 Rubber, vulcanized or thermoplastic. Accelerated ageing and heat resistance tests.
- [5] Kraśkiewicz C., Lipko C., Oleksiewicz W., Zbiciak A., Parametry charakteryzujące wibroizolacyjne maty podtłuczniowe stosowane w konstrukcji dróg szynowych i metody ich badania. Przegląd Komunikacyjny, nr 9, s. 76 – 82, 2015.
- [6] PN-EN ISO 62 Tworzywa sztuczne. Oznaczanie absorpcji wody.
- [7] PN-EN ISO 1798 Elastyczne tworzywa sztuczne porowate. Oznaczanie wytrzymałości na rozciąganie i wydłużenie przy zerwaniu.
- [8] PN-EN ISO 1856 Elastyczne tworzywa sztuczne porowate. Oznaczanie odkształcenia trwałego po ściskaniu.
- [9] PN-EN ISO 10846-2 Akustyka i drgania. Laboratoryjne pomiary właściwości przenoszenia wibroakustycznego elementów izolacyjnych. Część 2: Metoda dokładna wyznaczania sztywności dynamicznej izolacyjnych zawiesznień w ruchu postępowym.
- [10] PN-EN 1991-2 Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje. Część 2: Obciążenia ruchome mostów.
- [11] PN-ISO 37 Guma i kauczuk termoplastyczny. Oznaczanie właściwości wytrzymałościowych przy rozciąganiu.
- [12] PN-ISO 815 Guma i kauczuk termoplastyczny. Oznaczanie odkształcenia trwałego po ściskaniu w temperaturze otoczenia, podwyższonej lub niskiej.
- [13] Pudlik A., Projektowe i budowlane problemy związane ze stosowaniem mat wibroizolacyjnych. Praca dyplomowa magisterska, Kraków, 2014.
- [14] Research report No. 2808. Frost-Thaw tests on sub ballast mats of product family TRACKELAST SBM/RPU/Blue according to DIN 45673-5:2010-08. Technische Universität München. Monachium 2011 (za zgodą firmy Tines S.A.).
- [15] Wettschureck R. G., Kurze U. J., Einfügedämm-Maß von Unterschottermatten. ACUSTICA, 58, s. 177–182, 1985.
- [16] Wettschureck R. G., Unterschottermatten auf einer Eisenbahnbrücke in Stahlbeton-Verbundbauweise. DAGA 87, Aachen, s. 217–220, 1987.
- [17] Wettschureck R. G., Measures for reduction of the noise emission of railway bridges. Proceedings Workshop on Noise Emission of Steel Railway Bridges, Rotterdam. NS TO, Noise Group, Utrecht, 1996.
- [18] Wettschureck R. G., Heim M., Mühlbachler S., Reduction of structure-borne noise emissions from above-ground railway lines by means of ballast mats. Proceedings Inter-noise 97, s. 577–580, Budapest, 1997.
- [19] Wettschureck R. G., Breuer F., Tecklenburg M., Widmann H., Installation of highly effective vibration mitigation measures in a railway tunnel in Cologne, Germany. Rail Engineering International, 4, s. 12–16, 1999.

