

Wibroizolacja w nawierzchni kolejowej

Powszechne stosowanie w nawierzchni kolejowej podkładów betonowych powoduje liczne negatywne następstwa w stosunku do konstrukcji z podkładami drewnianymi. Należą do nich między innymi: zwiększone obciążenia dynamiczne podsypki i podtorza, kruszenie ziarn podsypki i ścieranie ich krawędzi, szczególnie w miejscu styku z powierzchnią podkładu, zmniejszenie oporu na boczne przesunięcie toru oraz zwiększenie sztywności konstrukcji nawierzchni powodujące wzrost oddziaływań między kołem a szyną. Zjawiska te można przynajmniej częściowo wyeliminować, stosując warstwy wibroizolacyjne między podkładem a podsypką.

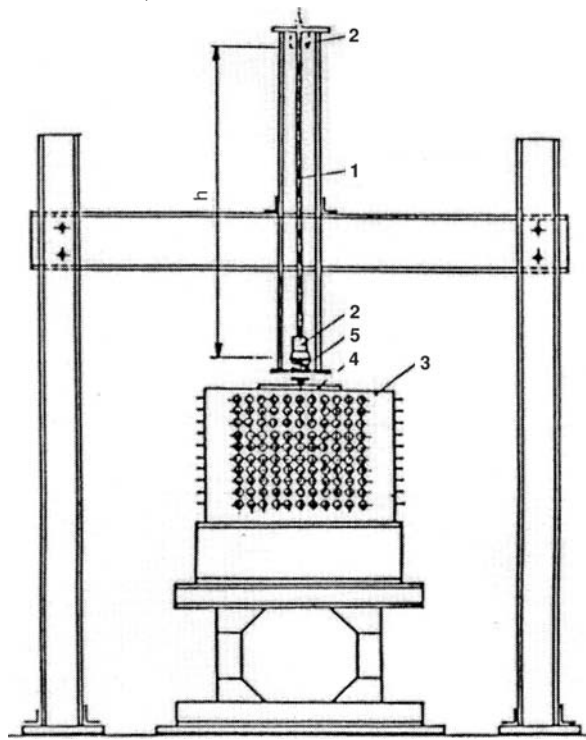
Opisana w artykule praca ma za zadanie uzasadnienie tej tezy. W tym celu przeprowadzony został cykl badań symulacyjnych – modelowych, pozwalających na porównanie oddziaływań dynamicznych podkładu na podsypkę w przypadku podkładów drewnianych, betonowych i betonowych z wibroizolacją [7].

Metoda badawcza

Do przeprowadzenia badań symulacyjnych wpływu materiału podkładu i warstw wibroizolacyjnych na sztywność nawierzchni i jej reakcję na wzbudzenie impulsowe wykorzystano model nawierzchni składający się z:

- odcinka szyny S 49 długości 30,3 cm, przymocowanego do odcinka podkładu długości 45 cm przytwierdzeniem K, z przekładką z płyty pilśniowej grubości 5 mm, i podkładką PCV grubości 3,0 mm (w przypadku podkładu betonowego);
- warstwy podsypki tłuczniowej, ułożonej w pojemniku o wymiarach 70×70×66 cm [1] ze ścianami wykonanymi z mogących się przemieszczać prostopadle do powierzchni ścian elementów, umożliwiającymi pomiar przemieszczeń i przyspieszeń drgań (rys. 1);
- warstwy wibroizolacyjnej między podkładem a podsypką;

- wzbudnika udarowego realizującego jednokrotny impuls siły za pomocą spadającej z zadanej wysokości masy o dobranej wartości (masa $m = 1775$ g, wysokość $h = 165$ cm).



Rys. 1. Schemat stanowiska pomiarowego [2]

1 - prowadnica masy wzbudnika, 2 - górne i dolne położenie masy wzbudzącej, 3 - pojemnik z odkształcalnymi ścianami i dnem z kalibrowanych elementów, 4 - model konstrukcji ruszta torowego, 5 - element wzbudnika przekazujący impuls siły

Wzbudzenie drgań układu następowało poprzez generowanie jednokrotnego impulsu działającego w kierunku pionowym na środkową część górnej powierzchni główki szyny (w połowie jej szerokości). Pomiar przyspieszeń i przemieszczeń drgań w układzie realizowany był dwupunktowo przy użyciu piezoelektrycznych czujników przyspieszeń, w kierunku pionowym na stopce szyny oraz w kierunku pionowym na dnie lub poziomym na ściankach pojemnika.

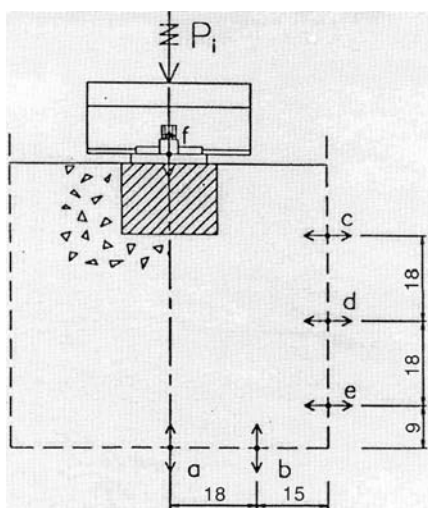
Oprócz badań dynamicznych, dla każdego z modeli konstrukcji nawierzchni wykonano pomiary statyczne, w celu oznaczenia współczynnika sprężystości podparcia szyny. Obciążano pionowo główkę szyny i mierzono przemieszczenia pionowe podkładu. W ten sposób uzyskano parametr pozwalający na dokonanie analizy porównawczej odpowiedzi poszczególnych modeli na wzbudzenie.

Program i zakres badań

Program badań obejmował pomiary statyczne i dynamiczne dla czterech modeli nawierzchni kolejowej przy stałej grubości warstwy podsypki wynoszącej 45 cm i tym samym materiale podsypkowym (tłuczeń granitowy #16/32 mm). Badane modele różniły się tylko rodzajem podkładu i wibroizolacji. Oznaczono je:

- d* – podkład drewniany,
b – podkład betonowy bez wibroizolacji,
bi – podkład betonowy z wibroizolacją z mikrogumy (12 mm) na dolnej jego powierzchni,
bj – podkład betonowy z wibroizolacją z folii PCV – 0,7 mm na dolnej i bocznych powierzchniach.

Pomiary statyczne przeprowadzono, obciążając modele siłą do 5,5 kN i mierząc przemieszczenia górnej powierzchni podkładów. Pomiary dynamiczne wykonano na szynie oraz na dnie i ściankach pojemnika (rys. 2).



Rys. 2. Rozmieszczenie punktów pomiarowych
a, b, f - pomiar przemieszczeń pionowych; *c, d, e* - pomiar przemieszczeń poziomych

Przemieszczenia i przyspieszenia drgań elementów dna mierzono w kierunku pionowym, a elementów ściany w kierunku poziomym. Ogółem przebadano 4 modele, wykonując pomiary w 6 punktach oraz w co najmniej 3 powtórzeniach.

Wyniki pomiarów

Wyniki pomiarów statycznych

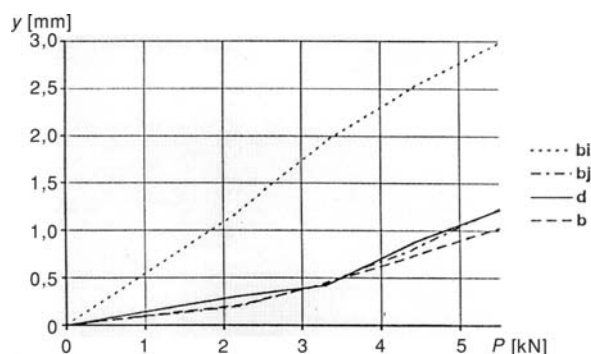
Pomiary sztywności podparcia podkładu w przyjętych do badań modelach dały w efekcie cztery uśrednione charakterystyki: *a, b, bi* i *bj*. Na rysunku 3 przedstawiono je w postaci graficznej.

Przyjmując średnie nachylenia krzywych na wykresach (rys. 3) w rejonie obciążenia $P = 3$ kN wyznaczono liczbowe wartości:

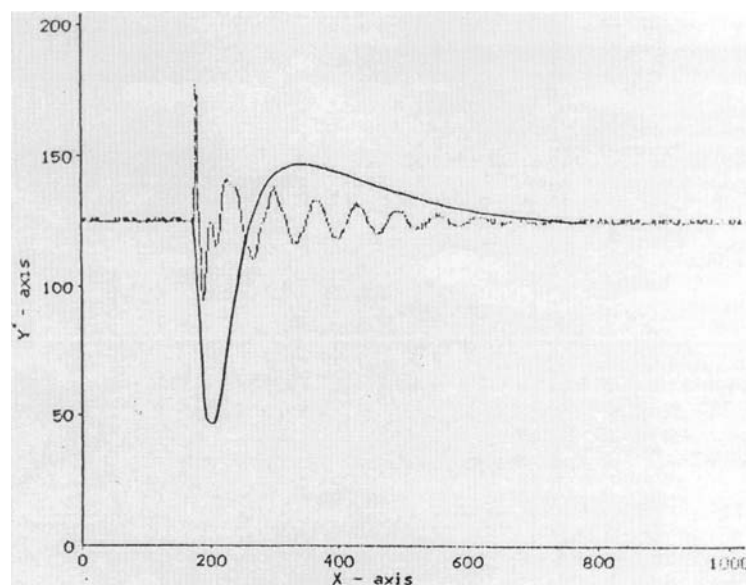
$$k = \frac{\Delta P}{\Delta y} \quad \text{przyjmując } \Delta y = 1 \text{ mm}$$

Otrzymano $k_d = 4,91$ kN/mm, $k_b = 5,39$ kN/mm, $k_{bi} = 2,1$ kN/mm i $k_{bj} = 4,58$ kN/mm.

Wyniki te pozwalają na uszeregowanie przyjętych do badań modeli. Najsztywniejszą konstrukcją nawierzchni reprezentuje model z podkładem betonowym, sztywność modelu z podkładem drewnianym z drewna miękkiego jest podobna do sztywności modelu z podkładem betonowym i wibroizolacją z folii PCV. Najbardziej podatną [5] konstrukcją nawierzchni reprezentuje model z podkładem betonowym i wibroizolacją z mikrogumy.



Rys. 3. Charakterystyki sztywności podparcia szyn dla modeli:
d - z podkładem drewnianym ($k = 4,91$ kN/mm), *b* - z podkładem betonowym ($k = 5,39$ kN/mm), *bi* - z podkładem betonowym i wibroizolacją z mikrogumy ($k = 2,10$ kN/mm), *bj* - z podkładem betonowym i wibroizolacją z folii PCV ($k = 4,58$ kN/mm)



Rys. 4. Niekalibrowane wykresy drgań modelu nawierzchni z podkładem drewnianym (*da*)

— przemieszczenia szyny,
 - - - - - przemieszczenia elementu „a” w dnie pojemnika

Wyniki pomiarów dynamicznych

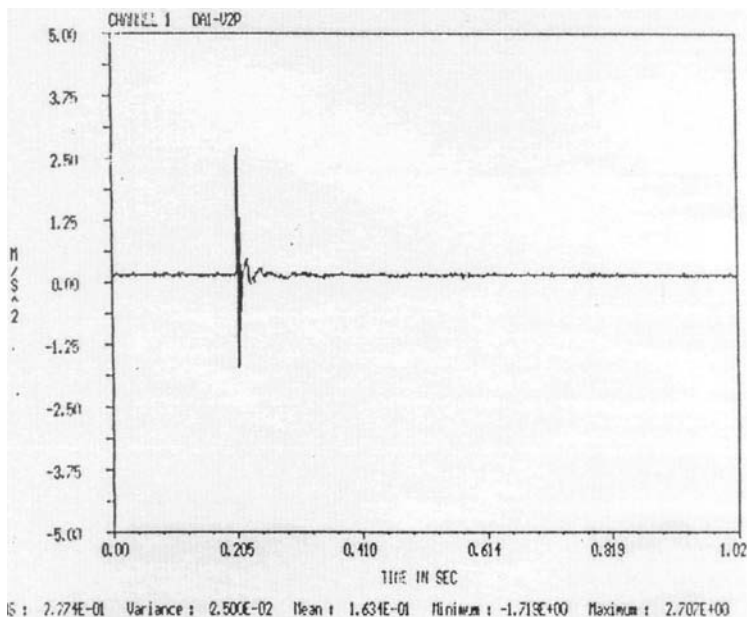
Z pomiarów dynamicznych uzyskano przemieszczenia i przyspieszenia drgań szyny, wywołane impulsem siły wymuszającej drgania układu, oraz przebiegi drgań elementów dna i ścian pojemnika w funkcji czasu w poszczególnych punktach pomiarowych, dla wszystkich badanych modeli. Niekalibrowane, otrzymane bezpośrednio z pomiarów sygnały dla modelu *d* pokazano przykładowo na rysunku 4. Przedstawiono na nim charakterystyczne wykresy opisujące pionowe przemieszczenia szyny i przemieszczenia zarejestrowane w punkcie pomiarowym „a”.

Pomierzono również przyspieszenia drgań elementów dna i ścian, jako odpowiedź układu na wzbudzenie impulsowe. Otrzymano przebiegi zmian tego parametru w czasie dla wszystkich punktów pomiarowych.

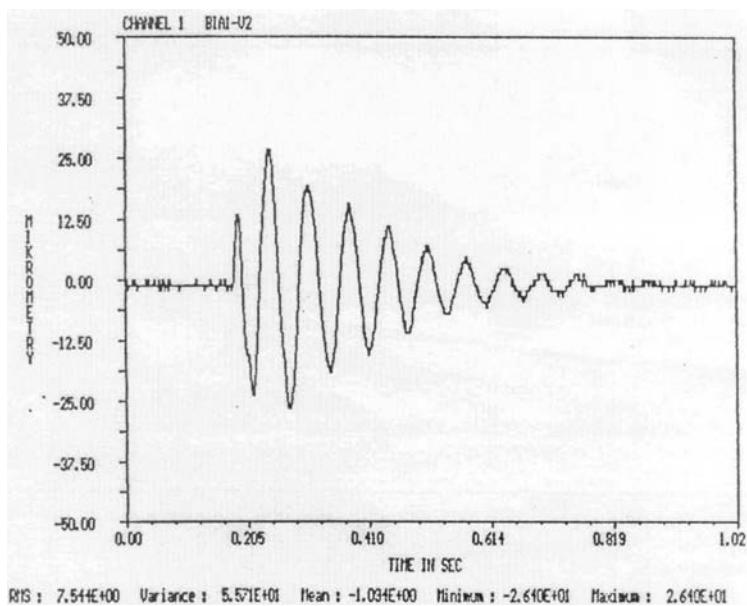
Charakterystyczny wykres, opisujący pionowe przyspieszenia drgań zarejestrowanych w punkcie pomiarowym „a”, przedstawiono na rysunku 5.

Analiza wyników

Analizę uzyskanych z przeprowadzonych badań wyników przedstawiono w dwóch częściach. Część pierwsza dotyczy porównania efektywnych odpowiedzi układu na wzbudzenie impulsowe w zakresie przemieszczeń, natomiast część druga dotyczy zarejestrowanych przyspieszeń drgań dla poszczególnych modeli. Całość przedstawionej analizy dotyczy wyników pomiarów wykonanych w punkcie pomiarowym „a”.



Rys. 5. Wykres przyspieszeń drgań elementu „a” w dniu pojemnika dla modelu nawierzchni z podkładem drewnianym (da)



Rys. 6. Przemieszczenia elementu „a” w dniu pojemnika dla modelu nawierzchni z podkładem betonowym i wibroizolacją z mikro gumy

Analiza wyników pomiarów przemieszczeń

Wstępną analizę przemieszczeń drgań przeprowadzono porównując sygnały otrzymane z pomiarów. Przykładowy wykres przedstawiono na rysunku 6, na którym pokazano kalibrowane przemieszczenia drgań w mikrometrach oraz ich zmiany w czasie – na osi odciętych w sekundach. Przedstawia on wyniki uzyskane dla podkładu betonowego z wibroizolacją z mikro gumy. Dalszą analizę przeprowadzono przyporządkowując wyniki dynamicznych pomiarów przemieszczeń wynikom badań statycznych. Wartościom k , umieszczonym na osi odciętych wykresu przedstawionego na rysunku 7, przyporządkowano wartości podwójnych maksymalnych amplitud przemieszczeń, zarejestrowanych dla poszczególnych modeli.

W ten sposób otrzymano układ punktów w układzie współrzędnych $(2A_{yj}; k)$ i wykreślono zależności $2A_y = f(k)$ w postaci krzywej regresji nieliniowej o równaniu:

$$2A_{ya} = 0,0037k^2 - 0,0222k + 0,0606 \quad (1)$$

Wyniki liczbowe odpowiadające wykresowi (rys. 7) podano w tabelicy 1.

Tablica 1

Wyniki badań dla poszczególnych modeli nawierzchni

Model nawierzchni	k [kN/mm]	A_a [m/s ²]	% $2A_{ab}$
bi	2,10	0,030	62,5
bj	4,58	0,037	77,1
d	4,91	0,041	85,4
b	5,39	0,048	100,0

Z tego zestawienia wynika, że przemieszczenia drgań przekazywanych na podtorze przez podsypkę w przypadku podkładów drewnianych są mniejsze o 15% od przemieszczeń drgań przenoszonych w przypadku podkładów betonowych, a przy zastosowaniu wibroizolacji redukcja osiąga wartości 23% i 37%. Nawet zastosowanie cienkiej warstwy wibroizolacyjnej w postaci folii PCV – 0,7 mm poprawia właściwości dynamiczne konstrukcji nawierzchni w większym stopniu niż zmiana podkładów na drewniane.

Analiza wyników pomiarów przyspieszeń drgań

Wstępną analizę wyników pomiarów przyspieszeń drgań przeprowadzono porównując sygnały zarejestrowane na granicy warstwy podsypki w punkcie pomiarowym „a”.

Dalszą analizę przeprowadzono przyporządkowując wyniki pomiarów przyspieszeń drgań wynikom badań statycznych, tzn. wartościom współczynników k charakteryzującym poszczególne modele nawierzchni. Wartości te przyjęto jako zmienną niezależną, przedstawiając je na osi odciętych. Jako zmienną zależną przyjęto wartości amplitud maksymalnych przyspieszeń drgań pomierzonych w punkcie pomiarowym „a” dla poszczególnych modeli nawierzchni.

Wynik analizy przedstawiono na rysunku 8, konstruując przybliżoną zależność $A_a = f(k)$ w postaci krzywej opisanej równaniem:

$$A_{aa} = 0,3343k^2 - 1,935k + 5,3627 \quad (2)$$

Wyniki liczbowe odpowiadające wykresowi (rys. 8) podano w tabelicy 2.

Tabelica 2

Wyniki badań dla poszczególnych rodzajów nawierzchni

Model nawierzchni	k [kN/mm]	A_a [m/s ²]	% $2A_{ab}$
b_i	2,10	2,77	59,6
b_j	4,58	3,51	75,5
d	4,91	3,92	84,3
b	5,39	4,65	100,0

Z zestawienia w tabelicy 2 wynika, że przyspieszenia drgań przekazywanych podtorzu przez podsypkę w przypadku podkładów drewnianych są mniejsze o 15% od przyspieszeń przekazywanych w przypadku podkładów betonowych, a przy zastosowaniu wibroizolacji redukcja sięga 25% i 40%. Już zastosowanie cienkiej warstwy wibroizolacyjnej (0,7 mm) poprawia właściwości dynamiczne konstrukcji nawierzchni bardziej niż zmiana podkładów na drewniane.

Skuteczność wibroizolacji – podsumowanie

Rezultaty analiz wyników pomiarów dadzą się opisać w sensie skuteczności wibroizolacji. Przez skuteczność wibroizolacji, czyli warstwy oddzielającej podkładu od podsypki chroniącej podsypkę przed nadmiernymi wpływami dynamicznymi, należy rozumieć efekt zmniejszenia amplitud przemieszczeń lub przyspieszeń drgań na styku podsypki z podtorzem. Miernikiem skuteczności wibroizolacji nazwano liczbowe określenie stosunku maksymalnej amplitudy sygnału dla modelu z podkładem betonowym bez wibroizolacji do amplitud sygnałów dla modeli z podkładem drewnianym i podkładem betonowym z wibroizolacją. Wobec analizowania dwóch parametrów: podwójnej amplitudy przemieszczeń drgań $2A_y$ oraz amplitudy przyspieszeń drgań A_a , przyjęto dwa mierniki:

$$S_{wy} = \frac{2A_{yb}}{2A_{ybi}} \quad \text{oraz} \quad S_{wa} = \frac{A_{ab}}{A_{abi}} \quad (3)$$

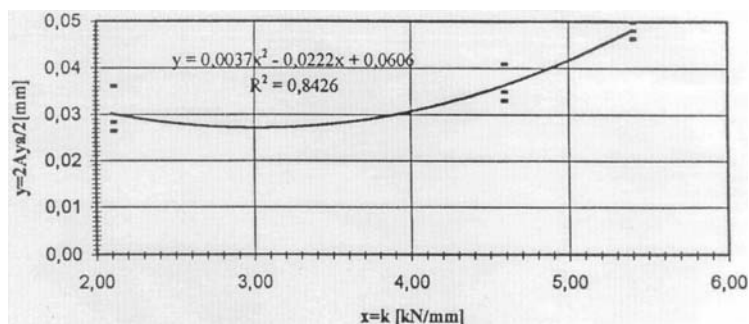
gdzie:

S_{wy} – miernik skuteczności wibroizolacji – bezwymiarowy,
 $2A_{yb}$ – podwójna maksymalna amplituda przemieszczeń drgań pomierzonych w jednym z punktów pomiarowych dla modelu nawierzchni z podkładem betonowym,

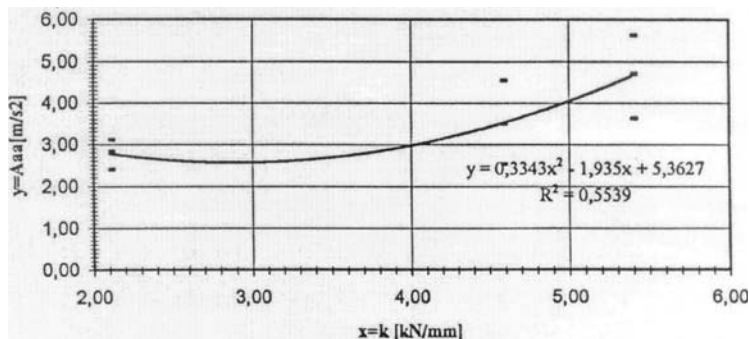
$2A_{ybi}$ – podwójna maksymalna amplituda przemieszczeń drgań pomierzonych w tym samym punkcie pomiarowym jak dla $2A_{yb}$, dla modelu nawierzchni z podkładem drewnianym lub betonowym i wibroizolacją,

S_{wa} – miernik skuteczności wibroizolacji – bezwymiarowy,
 A_{ab} – maksymalna amplituda przyspieszeń drgań zarejestrowana w jednym z punktów pomiarowych dla modelu nawierzchni z podkładem betonowym,

A_{abi} – maksymalna amplituda przyspieszeń drgań zarejestrowana w tym samym punkcie pomiarowym jak dla $2A_{ab}$, dla modelu nawierzchni z podkładem drewnianym lub betonowym i wibroizolacją.



Rys. 7. Zależność przemieszczeń drgań w punkcie pomiarowym „a” od sztywności podparcia podkładu



Rys. 8. Zależność maksymalnych przyspieszeń drgań w punkcie pomiarowym „a” od sztywności podparcia podkładu

Przyjęcie mierników skuteczności wibroizolacji według tej formuły daje liczbowe określenie efektu jej zastosowania. Im wyższe wartości mierników, tym większy efekt, czyli większa skuteczność.

Wartości uzyskanych z badań mierników dla przebadanych modeli nawierzchni kolejowej zestawiono w tabelicy 3. Takie ujęcie wyników pomiarów pozwala na wyselekcjonowanie w toku przewidywanych dalszych badań najskuteczniejszych rozwiązań technicznych, zapewniających najlepszą ochronę warstwy podsypki i podtorza przed nadmiernymi wpływami dynamicznymi.

Z danych liczbowych zawartych w tabelicy 3 wynika, że najwyższą wartość miernika skuteczności wibroizolacji S_{wy} otrzymano dla modelu b_i dla przenoszenia drgań bezpośrednio pod podkładem w osi wzbudzenia. Dla tego modelu nawierzchni $S_{wy} = 1,60$.

Tabelica 3

Wartości mierników skuteczności wibroizolacji

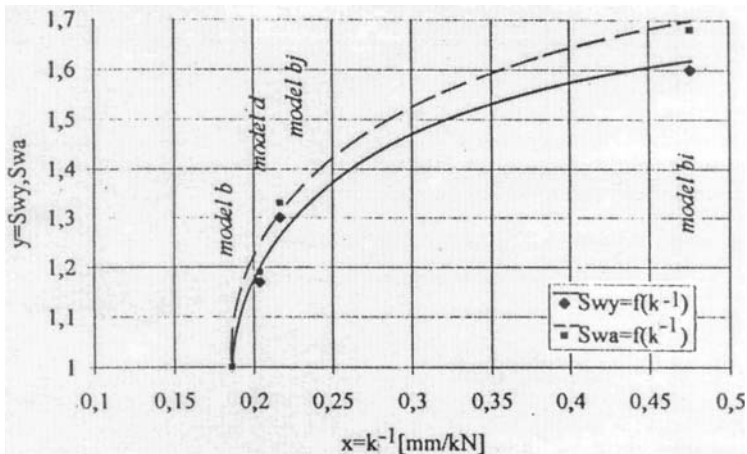
Model	Punkt „a”	
	S_{wy}	S_{wa}
d	1,17	1,19
b_j	1,30	1,33
b_i	1,60	1,68

Zastosowanie podkładów drewnianych zamiast betonowych powoduje zmniejszenie przemieszczeń na granicy podsypki i podtorza w takim stopniu, że $S_{wy} = 1,17$.

W podobny sposób zaznacza się również skuteczność stosowania wibroizolacji przy analizie przyspieszeń drgań. Współczynnik skuteczności dla pionowego kierunku propa-

gacji fal wynosi dla podkładów drewnianych $S_{wa} = 1,19$, dla izolacji z folii PCV $S_{wa} = 1,33$, a dla wibroizolacji z mikrogumy $S_{wa} = 1,68$.

Przybliżoną zależność współczynników skuteczności wibroizolacji od podatności podparcia podkładów k^{-1} przedstawiono graficznie na rysunku 9. Przebieg wykresów pozwala na ocenę efektywności zwiększania parametru k^{-1} z punktu widzenia efektów zastosowania warstwy wibroizolacyjnej.



Rys. 9. Zależność współczynnika skuteczności wibroizolacji od podatności nawierzchni

Interpretacja fizyczna przedstawionej na rysunku 9 zależności potwierdza, że już zastosowanie cienkiej warstwy izolacyjnej daje lepszy efekt niż stosowanie podkładów drewnianych. Dalsze zwiększanie podatności wibroizolacji jest mniej efektywne. Zastosowanie miękkiej mikrogumy o grubości warstwy 12 mm daje przyrost współczynnika skuteczności w stosunku do warstwy z PCV taki, jak zastosowanie warstwy PCV w stosunku do podkładu betonowego bez wibroizolacji. Spostrzeżenie jest istotne, ponieważ nadmierne zwiększanie podatności konstrukcji nawierzchni kolejowej mogłoby spowodować przekroczenie naprężeń dopuszczalnych w szynach [6].

Jeżeli potraktujemy przyspieszenie jako czynnik generujący siłę, to dynamiczne obciążenia podtorza przy zastosowaniu wibroizolacji mogą zostać zredukowane nawet o połowę.

Jest to istotna poprawa warunków dynamicznego obciążania podsypki i podtorza, ponieważ pod podkładami występują maksymalne naprężenia w podsypce, a efekty ich występowania są najbardziej destrukcyjne.

Jest rzeczą oczywistą, że materiał wibroizolacyjny musi spełniać jeszcze inne wymagania, szczególnie co do jego trwałości i niezmienności jego cech w trudnych warunkach eksploatacyjnych. Dlatego też badania będą kontynuowane, a wyselekcjonowane najlepsze materiały wibroizolacyjne, które można zastosować na styku podkład–podsypka, powinny zostać również sprawdzone w warunkach eksploatacyjnych, najlepiej w torze doświadczalnym. □

Literatura

- [1] Mazur S.: *Möglichkeiten der Laboruntersuchungen an dynamischen Eigenschaften der Schüttboden*. Tiefbau Ingenieurbau Straßenbau 5/1987, s. 288–294.
- [2] Piotrowski A.: *Propagacja drgań w podsypce i podłożu nawierzchni szynowej*. Raport IIL PWR, SPR 10/1993.
- [3] Zacher M.: *Unrunde Räder und Oberbausfestigkeit*. Eisenbahntechnische Rundschau ETR/45 (1996), H. 10, s. 605.
- [4] Pisarczyk S.: *Czynniki wpływające na wibracyjne zagęszczanie gruntów niespoistych*. Inżynieria i Budownictwo 8/1996, s. 475.
- [5] Langer J.: *Dynamika budowli*. Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej. Wrocław 1980.
- [6] Eisenmann J., Leykauf G., Mattner L.: *Vorschläge zur Erhöhung der Oberbauelastizität*. Eisenbahntechnische Rundschau ETR/43 (1994), H. 7/8, s. 491.
- [7] Krużyński M.: *Badania izolacji antywibracyjnej w nawierzchni kolejowej*. IX Krajowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Drogi Kolejowe”. Kraków, X 1997.

RESEARCH OF VIBROINSULATION IN RAILWAY TRACK STRUCTURE

The objective of the work was to give reason for the usage of vibroinsulation in the railway track structure, on the contact surface between sleeper and ballast. In order to check the efficacy of such construction, the model experiment was carried out. As a result the decrease of displacement and acceleration of subgrade vibrations between 25,5 and 40% was achieved for a sleeper with vibroinsulation.