

dr hab. inż. Włodzimierz Bednarek<sup>1)</sup>  
ORCID: 0000-0002-3693-9621

# Wybrane rozwiązania zwiększające trwałość podsypki tłuczniowej eksploatowanej nawierzchni kolejowej

## *Selected solutions increasing durability of breakstone ballast in operated railway track structure*

DOI: 10.15199/33.2023.10.09

**Streszczenie.** Główną rolą współpracujących ze sobą warstw ziarnistych w nawierzchni kolejowej, tzn. podsypki, warstwy ochronnej i podtorza jest zapewnienie przekazywania obciążeń oraz odpowiednie podparcie rusztu torowego. Podsypka jest jednak najsłabszym elementem nawierzchni kolejowej, dlatego wymaga odpowiedniego doboru materiału, uziarnienia, wzmocnienia czy zagęszczenia. W artykule opisano stosowane rozwiązania w materiale ziarnistym podsypki tłuczniowej zwiększające trwałość zarówno samej podsypki, jak i eksploatowanej nawierzchni kolejowej. Zastosowanie elementów sprężystych wg ich sztywności rekomendowano w celu zwiększenia trwałości podsypki kolejowej na etapie projektowania, budowy i utrzymania eksploatowanych nawierzchni kolejowych. Wskazano również zalecane rozwiązania do stosowania w praktyce inżynierskiej, które można dostosować do aktualnego cyklu życia nawierzchni kolejowej.

**Słowa kluczowe:** podsypka; innowacyjne rozwiązania w pod-sypce; elementy sprężyste; trwałość podsypki.

**Abstract.** The main role of the cooperating layers in railway track structure: ballast, protective layer and subgrade is to provide load transfer and proper support of the railway track. However, the ballast is the weakest element in the ballasted railway track structure, therefore it requires the appropriate selection of material, grain size, strengthening or compaction. The used solutions in the granular material of the breakstone ballast increasing the durability of both the ballast itself and the operated railway track structure are described. The use of elastic elements according to their stiffness are recommended to increase the durability of the railway ballast at the stage of design, construction and maintenance of operated railway track structures. The recommended solutions for use in engineering practice, which can be adapted to the current cycle life of the railway track structure, are also shown.

**Keywords:** ballast; innovative solutions in ballast; elastic elements; durability of the ballast.

Przy coraz większym ruchu kolejowym nawierzchnia kolejowa ulega postępującej degradacji, ponieważ przekazywane pionowe i poprzeczne dynamiczne obciążenia zwiększają się wraz ze wzrostem prędkości i nacisku na oś. Siły pionowe wywierane na szynę ( $F_v$ ) składają się z sześciu różnych składowych [1]. Są to: siła statyczna koła  $F_{v0}$  (100%); siła quasi-statyczna w łuku  $F_{vk}$  (0 – 40%); siła dynamiczna spowodowana nierównościami szyny  $F_{vds}$  (0 – 300%); siła dynamiczna ze względu na spłaszczenie koła  $F_{vdh}$  (0 – 300%); siła hamowania  $F_{vdb}$  (0 – 20%); wpływ asymetrii  $F_{vj}$ , np. nadmiar lub niedomiar przechyłki (0 – 10%). Zwiększone dynamiczne obciążenia są spowodowane imperfekcjami w kołach lub szynach (np. spłaszczenie koła, rozjazd, skrzyżowania, luz dylatacyjny między szynami, niedoskonałe spawy czy zużycie faliste szyn). Przekazywane

dalej zwiększone obciążenia na warstwy ziarniste powodują postępujące odkształcenia wraz z przejazdem pociągów, a w efekcie kumulatywne pogorszenie geometrii toru, która jest podstawowym parametrem, szczególnie na liniach dużych prędkości [2]. Osiadanie warstwy ziarnistej jest efektem utraty kontaktu między ziarnami lub ich pękaniem pod wpływem powtarzających się obciążeń dynamicznych. Jest ono równe sumie odkształceń różnych warstw zastosowanych w celu rozłożenia obciążeń przenoszonych na współpracujące warstwy. W pracy [3] wykazano, że **pod-sypka jest warstwą o największym udziale w osiadananiu nawierzchni kolejowej** (do 50 – 70% całkowitej deformacji pionowej). Autorzy prac [3 ÷ 5] na podstawie pomiarów w torach kolejowych wykazali, że osiadanie podsypki odbywa się „nieliniowo” lub istnieje liniowa zależność między średnim osiadaniami a deformacją pionową toru. Oznacza to, że wzrost degradacji podsypki może prowadzić do istotnej degradacji geometrii na-

wierzchni kolejowej. Postępująca degradacja geometrii, a także hałas i drgania zostały zidentyfikowane jako ważne problemy, które należy zredukować, np. przez modyfikację sztywności pionowej i dążenie do uzyskania jej jednorodnej wartości wzdłuż toru. Jednym ze sposobów minimalizacji tych problemów jest montaż elementów sprężystych (np. przekładek podszynowych, podkładek z tworzyw sztucznych, podkładek podpodkładowych czy mat podtłuczniowych) w nawierzchni kolejowej [2]. Ciekawe są analizy możliwości przewidywania, za pomocą sztucznych sieci neuronowych, wartości statycznych i dynamicznych modułów podsypki prototypowych podkładek podpodkładowych (USP) pochodzących z recyklingu, w celu dostosowania ich parametrów technicznych (gęstość i grubość) [6]. Ponadto wibroizolatory, bazujące na materiałach elastomerowych pochodzących z recyklingu, mają potencjał do powszechnego zastosowania w ekologicznie zrównoważonych systemach nawierzchni

<sup>1)</sup> Politechnika Poznańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Transportu; wlozdzimierz.bednarek@put.poznan.pl

ni kolejowych [7]. Powstające drgania pionowe powodują także zmęczenie współpracujących elementów (np. systemu przytwierdzenia) oraz mogą inicjować rozluźnienie podsypki, które po osiągnięciu krytycznego poziomu przyspieszenia ziaren prowadzi do uplastycznienia podsypki [8, 9].

Zmiany geometrycznego położenia toków szynowych następują również wskutek zmiany ich podparcia oraz robót wykonywanych w nawierzchni (podbijanie toru czy oczyszczanie podsypki). Przyczyną deformacji toru jest zróżnicowanie charakterystyk podparcia w różnych jego przekrojach powstające wskutek nierównomiernego osiadania podsypki w czasie eksploatacji, zwiększonych odkształceń zwłaszcza tzw. wypierania podsypki spod podkładów czy słabego podtorza. W wyniku formującej się nierówności, czynniki te są powodem kontaktu podkładu z warstwą podsypki (np. efekt *wiszących podkładów* [10, 11]). Sztywność toru w stanie nieobciążonym (bez nacisków od pojazdów) powoduje, że podkłady w różnym stopniu opierają się na podsypce. W najbardziej niekorzystnym przypadku może wystąpić zupełny brak kontaktu podkładu z podsypką. W torze nieobciążonym trudno ocenić skutki takich miejscowych nierówności w przypadku pracy się przez [17]:

## Podsypka w nawierzchni kolejowej

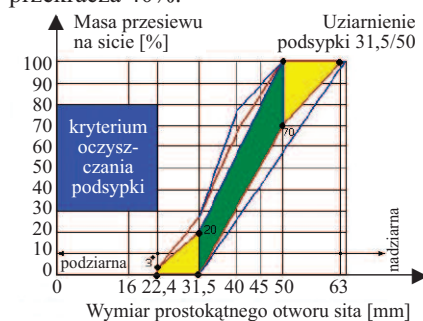
Podsypka w nawierzchni kolejowej to warstwa sytkiego, gruboziarnistego kruszywa kamiennego o średnicy ziaren 31,5 – 50,0 mm i ostrych krawędziach. Wymagania dotyczące podsypki zawarte są w polskich przepisach [14, 15], w których podano podstawowe zalecenia dotyczące kruszywa na podsypkę kolejową oraz podstawowe regulacje wykonania i odbioru podsypki tłuczniowej naturalnej i z recyklingu stosowanej w nawierzchni kolejowej.

Podstawowe problemy spotykane w eksploatowanej podsypce to kruszenie, ścieranie i zanieczyszczenie podsypki. Sukcesywna optymalizacja jej uziarnie-

nia związana jest głównie z minimalizacją procesów oczyszczania i uzupełniania podczas rutynowych czynności utrzymania nawierzchni kolejowej [16, 17].

Rysunek 1 pokazuje kryterium oczyszczania podsypki tłuczniowej. Pełna funkcja pracy podsypki powinna zostać przywrócona przez jej profilowanie i oczyszczanie. Ogólne zasady przeprowadzania oczyszczania i uzupełniania podsypki są następujące [16]:

- oczyszczanie podsypki staje się właściwe przy ilości ponad 30% ziaren o średnicy mniejszej niż 22 mm;
- oczyszczanie podsypki jest absolutnie konieczne, gdy zanieczyszczenie przekracza 40%.



\* podsypka po transporcie na budowę ≤ 5%  
 ● wymagany zakres ● rekomendowany zakres

**Rys. 1. Kryterium oczyszczania podsypki [16]**  
 Fig. 1. Criterion of ballast cleaning [16]

Spełnienie zadań stawianych podsypce w nawierzchni kolejowej uzyskuje się przez [17]:

- właściwy profil i rozmiar pryzmy podsypki;
- stosowanie materiałów na podsypkę o dużej odporności na ściskanie, odpornych na wpływy atmosferyczne i odpowiednio małej rozkruszalności;
- dobre zagęszczenie i utrzymanie podsypki;
- układanie podsypki na stabilnym, prawidłowo ukształtowanym i odwodnionym podtorzu.

Podczas eksploatacji bezстыkowego toru kolejowego dochodzi do powstawania różnej postaci kontaktu koła z szyną, podkładu z podłożem podsypkowym czy niekorzystnych, niezamierzonych imperfekcji kontaktu toru z podłożem gruntowym. Pod wpływem przejeżdżających pociągów powstają imperfekcje koła oraz podłoża szynowego, które zmniejszają trwałość nawierzchni kolejowej [11, 18]. Jak wskazują doświadczenia kolei europejskich

[2], **rekomen-dowana wartość sztywności pionowej toru to 50 – 80 kN/mm** (ze względu na obciążenia dynamiczne, rozpraszaną energię, koszty energii, pogorszenie jego stanu, ponoszone koszty podczas utrzymania).

## Naprężenia przekazywane na podsypkę i torowisko

Wykonałem badania terenowe i analizę nierówności w torze kolejowym. W przypadku wygenerowanej nierówności, podniesienie toru na długości dwóch rozstawów podkładów, uzyskano następujące wartości w przekroju nr 2 (rysunek 2a):

Należy podkreślić, że symulowana nierówność zmienia wartość siły przekazywanej z szyny na podkład kolejowy (rysunek 2b) z 44,284 kN do 59,763 kN (o 34,95%). Siła taka powoduje średnie naprężenie działające na podsypkę (pod podkładem) liczone ze wzoru [19]:

$$\sigma_z^{pod} = \frac{2 \cdot Q_{max}}{\alpha \cdot A} \quad [MPa] \quad (1)$$

gdzie:

$Q_{max}$  – maksymalna siła przekazywana z szyny na podkład kolejowy [kN];  
 $A$  – powierzchnia oparcia podkładu [m<sup>2</sup>];  
 $\alpha$  – współczynnik ugięcia podkładu [-] (1,0 w przypadku podkładu betonowego, 0,8 – drewnianego).

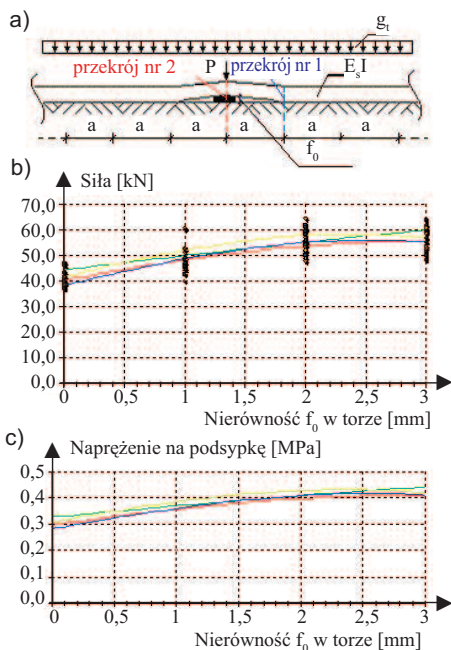
Uzyskana z badań wartość siły (rysunek 2b), z przyjętym współczynnikiem dynamicznym, powoduje zmianę naprężeń przekazywanych na podsypkę z 0,28 MPa aż do 0,44 MPa (przy wartości dopuszczalnej 0,5 MPa w przypadku podsypki ze skał twardych [19]). Wartości te pozwalają unaocznic skalę zachodzących zmian, a przede wszystkim zwiększone naprężenia przekazywane na podsypkę.

Naprężenie przekazywane na torowisko liczone jest w zależności od grubości podsypki, wymiarów podkładu i aktualnego stanu podsypki – parametr  $\eta$  [19, 20]:

$$\sigma_z^{tor} = \frac{1,5 \cdot Q_i}{[3 \cdot (p_p - s_g) + w] \cdot h_p \cdot tg(\eta)} \quad [MPa] \quad (2)$$

gdzie:

$Q_i$  – siła przekazywana z szyny na podkład [kN];  
 $p_p$  – długość podkładu [m];  
 $s_g$  – szerokość toru [m];  
 $w$  – szerokość podkładu [m];  
 $h_p$  – grubość podsypki [m];  
 $\eta$  – kąt rozprzestrzeniania się naprężeń w podsypce [°];  $\eta = 36^\circ$  (stan dobry),  $\eta = 35^\circ$  (stan przeciętny);  $\eta = 32^\circ$  (stan zły).



**Rys. 2.** Analiza wywołanej nierówności w torze kolejowym (obliczenia własne): a) schemat wywołanej nierówności; b) siła przekazywana z szyny na podkład; c) naprężenie przekazywane na podsypkę wskutek generowanych nierówności (w przypadku przyjętego współczynnika dynamicznego 2,0), gdzie:  $f_0$  – nierówność wywołana w torze kolejowym [mm];  $P$  – przyłożona siła 90 kN/koło;  $E_s \cdot I$  – sztywność toru w płaszczyźnie pionowej ( $I = 1819 \text{ cm}^4$ ) [ $\text{MNm}^2$ ];  $g_t$  – ciężar toru 0,0022 MN/m;  $a$  – rozstaw podkładów 0,6 m

Fig. 2. Analysis of the irregularity in the railway track (own calculations): a) the scheme of the generated irregularity; b) the force transferred from the rail to the sleeper; c) stress transferred to the ballast due to the generated irregularity (for the assumed dynamic coefficient of 2.0) where:  $f_0$  – the generated irregularity in the railway track, mm;  $P$  – applied force: 90 kN/wheel;  $E_s \cdot I$  – track stiffness in the vertical plane ( $I = 1819 \text{ cm}^4$ ),  $\text{MNm}^2$ ;  $m^2$  – track weight 0.0022 MN/m;  $a$  – sleeper spacing 0.6 m

Dopuszczalne naprężenie działające na powierzchnię torowiska uwzględniające liczbę cykli obciążenia  $n$  (podczas eksploatacji) liczone jest ze wzoru [16]:

$$\sigma_{dop}^{tor} = \frac{0,006 \cdot E_{v2}}{1 + 0,7 \cdot \log(n, 10)} \text{ [MPa]} \quad (3)$$

gdzie:

$E_{v2}$  – moduł odkształcenia [MPa] [21];  
 $n$  – liczba cykli obciążenia [-].

Przyjmując następujące dane do obliczeń:

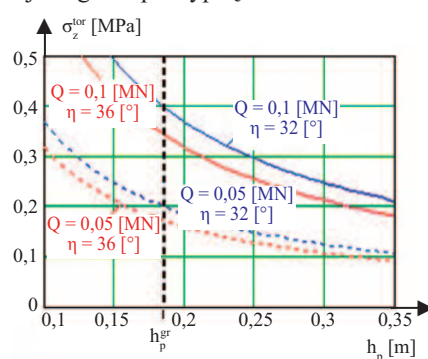
a) wartość siły przekazywanej z szyny na podkład  $Q = 50 \text{ kN}$  i  $Q = 100 \text{ kN}$ ;

b) długość podkładu  $p_p = 2,5 \text{ m}$ ; szerokość toru  $s_g = 1,5 \text{ m}$ ; szerokość podkładu  $w = 0,27 \text{ m}$ ;

c) kąt rozprzestrzeniania się naprężeń w podsypce [ $^\circ$ ];  $\eta = 36^\circ$  (stan dobry) oraz  $\eta = 32^\circ$  (stan zły);

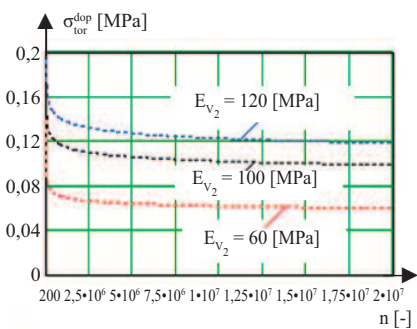
d) moduł odkształcenia  $E_{v2}$  o wartości 60, 100 i 120 MPa oraz liczby cykli obciążenia ( $n$ ) w zakresie  $2 \cdot 10^2 \div 2 \cdot 10^7$  uzyskano zależności przedstawione na rysunku 3 oraz na rysunku 4:

Jak wskazują obserwacje i pomiary w eksploatowanym torze (np. pomiary dreżyny pomiarowej), autorskie badania (rysunek 2c) oraz analizy [10 – 12], podczas eksploatacji może dochodzić do przekroczenia dopuszczalnych naprężeń przekazywanych z podkładu kolejowego na podsypkę i torowisko.



**Rys. 3.** Naprężenie przekazywane na torowisko (podkład betonowy)

Fig. 3. The stress transferred on railway subgrade (concrete sleeper)



**Rys. 4.** Dopuszczalne naprężenie działające na powierzchnię torowiska

Fig. 4. The allowable stress acting on the surface of railway subgrade

## Materiał ziarnisty podsypki tłuczniowej

Podstawowym materiałem na podsypkę jest tłuczeń łamany o ostrych krawędziach, uzyskiwany z twardych magmowych skał głębinowych (dioryt, gabra, granit, sjenit) oraz wylewnych (bazalt, porfir). W nawierzchni podsypkowej, to właśnie podsypka jest najsłabszym elementem w układzie szyna-podkład-podsypka. Istnieje więc konieczność zwią-

szania jej trwałości. Jednym ze stosowanych rozwiązań jest dobór jakości i rodzaju oraz składu ziarnowego tłucznia.

**Rozwiązania w podsypce tłuczniowej stosowane w celu spowolnienia postępującej jej degradacji i zwiększenia trwałości eksploatowanej nawierzchni kolejowej są następujące:**

- eliminacja warstwy podsypki z konstrukcji nawierzchni kolejowej (rozwiązania nawierzchni bezpodsypkowych);
- zastosowanie komponentów zwiększających odporność warstwy podsypki na rozdrobnienie (dekonsolidację), np. kompozyt tłuczniowy w postaci warstwy tłucznia uzbrojonego geosiatkami [22] – fotografia a;

- miejscowe stabilizowanie chemiczne (powierzchniowy natrysk specjalnym spoiwem wykonanym na bazie żywic poliuretanowych) [22, 23] – fotografia b;

- stabilizacja podsypki tłuczniowej za pomocą piany poliuretanowej wstrzykniętej w okienka międzypodkładowe;

- układanie specjalnych mat stabilizujących położenie ziaren podsypki czy stosowanie worków podsypkowych (ballast bag) [24] na linii dużych prędkości (fotografia c);

- zmniejszenie przeciążeń powodowanych przez nasyp kolejowy na podłożu (słabym) podłożu przez zastosowanie lekkich [25], naturalnych i sztucznych materiałów ziarnistych (np. Leca – lekkie kruszywo z keramzytu czy Glasopor – kruszywo ze szkła spienionego [26]) – fotografia d; dodatkowe zalety lekkich materiałów to: niewielka gęstość objętościowa, mała nasiąkliwość oraz duża wytrzymałość;

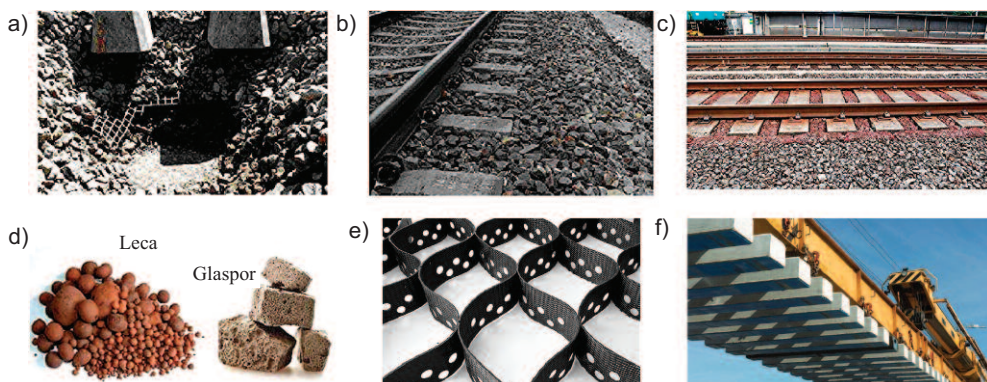
- stosowanie elementów sprężystych w nawierzchni [2, 27 ÷ 30] – fotografie e i f, takich jak:

- miękkie przekładki podszynowe o sztywności do 80 kN/mm [2] (skuteczne w zmniejszaniu nacisków przekazywanych na torowisko oraz redukcji drgań podkładów i podsypki);
- zmniejszenie sztywności przekładek podszynowych może zmniejszyć vibracje i hałas podkładów oraz cząstek podsypki;

- miękkie podkładki podpodkładowe (Under Sleeper Pads – USP) – skuteczne w obniżaniu osiadania i redukcji drgań podsypki;

- podkładki podpodkładowe zwiększają powierzchnię kontaktu podkładu





**Stosowane rozwiązania w materiale ziarnistym podsypki tłuczniowej zwiększające trwałość eksploatowanej nawierzchni kolejowej: a) kompozyt tłuczniowy [22]; b) stabilizacja chemiczna podsypki [22]; c) worki podsypkowe [24]; d) lekkie materiały ziarniste [26]; e) geosyntetyki [37]; f) podkładki podpodkładowe (USP) [38]**

*Solutions used in the granular material of the breakstone ballast increasing the durability of the operated railway track structure: a) breakstone composite [22]; b) chemical stabilization of the ballast [22]; c) ballast bag [24]; d) lightweight granular materials [26]; e) geosynthetics [37]; f) under sleeper pads (USP) [38]*

z podsypką (z 5 – 8% do aż 30 – 35% przy podatności 0,2 N/mm<sup>3</sup>) oraz obniżenie ciśnienia na podsypkę ok. 10 – 25%;

- obniżenie siły przekazywanej na podsypkę wskutek efektu „wiszących podkładów”;

- sztywne podkładki podpodkładowe – skuteczne w zmniejszeniu grubości podsypki;

- miękkie podkładki podpodkładowe (0,08 – 0,15 N/mm<sup>3</sup>) [6, 29] powinny być instalowane w nawierzchni w celu zmniejszenia naprężeń przekazywanych na podsypkę;

- podkładki o średniej sztywności (0,15 – 0,25 N/mm<sup>3</sup>) [6, 29] są najbardziej odpowiednie do osiągnięcia progresywnej zmiany sztywności w całym torze;

- mata podpodsypkowa (*Under Ballast Mats* – UBM) – pozwala na zwiększenie obszaru styku między warstwą podsypki a warstwami ochronnymi, co istotnie zmniejsza naprężenia przenoszone przez podsypkę na torowisko, powodując w ten sposób mniejsze osiadanie;

- mata podpodsypkowa chroni podsypkę, powodując znaczne zmniejszenie kontaktu podsypki z torowiskiem i zapewniając większą elastyczność układu torowego, dzięki czemu obciążenie pociągów jest rozłożone na większy obszar, zmniejszając w ten sposób przenoszone naprężenia;

- maty podpodsypkowe (UBM) stosuje się głównie w celu zmniejszenia drgań o niskiej częstotliwości przenoszonych na podłoże oraz w celu zwiększenia

elastyczności toru, przy czym wskazane jest stosowanie miękkich mat (o module mniejszym niż 0,06 N/mm<sup>3</sup>) [30, 31]); jednocześnie maty te zmniejszają naprężenia przekazywane na torowisko czy warstwy ochronne podtorza;

- sukcesywne oczyszczanie i uzupełnianie podsypki tłuczniowej (rysunek 1);

- nowe metody analizy rozkładu wielkości cząstek podsypki kolejowej za pomocą techniki przetwarzania obrazu [32] czy przemysłany recykling podsypki tłuczniowej [13];

- sposoby mechanicznego zagęszczania podsypki [33 – 35] czy dobór uziarnienia i kształtu ziaren [36];

- innowacyjne podkłady kolejowe (np. hiszpański projekt o nazwie Aurigidas [24]).

## Wnioski

Stosowanie najsłabszego elementu, czyli podsypki w podsypkowych nawierzchniach kolejowych wymaga wykorzystania odpowiednich rozwiązań w celu wydłużenia trwałości eksploatacyjnej zarówno nawierzchni kolejowej, jak i samej podsypki. Stosowane są następujące grupy rozwiązań:

a) I grupa – eliminacja podsypki w nawierzchni kolejowej (nawierzchnie bezpodsypkowe);

b) II grupa – wzmacnianie podsypki tłuczniowej (np. kompozyt tłuczniowy, chemiczna stabilizacja czy maty i worki podsypkowe);

c) III grupa – próby stosowania różnych rodzajów lekkich, wytrzymałych,

naturalnych i sztucznych materiałów ziarnistych;

d) IV grupa – stosowanie elementów sprężystych w nawierzchni (przekładki podszynowe, USP czy UBM);

e) V grupa – sukcesywne oczyszczanie i uzupełnianie podsypki tłuczniowej oraz metody analizy rozkładu cząstek podsypki kolejowej za pomocą np. technik przetwarzania obrazu;

f) VI grupa – dalsze poszukiwania optymalnego uziarnienia, materiału podsypki oraz skutecznych sposobów mechanicznego zagęszczania podsypki kolejowej.

Analizy teoretyczne, badania laboratoryjne, obserwacje i pomiary w torze oraz doświadczenie sukcesywnie zdobywane w wielu krajach pozwalają na optymalizowanie stosowanych metod i rozwiązań istotnie wpływających na zachowanie się nawierzchni podczas jej eksploatacji. Zastosowanie elementów sprężystych w nawierzchni kolejowej (odpowiednio dobranych przekładek podszynowych, podkładek podpodkładowych (USP) czy mat podtłuczniowych (UBM)) należy traktować jako ich rekomendację w celu zwiększenia trwałości podsypki kolejowej na etapie projektowania, budowy, a szczególnie podczas długoletniego procesu utrzymania eksploatowanych nawierzchni kolejowych (tabela).

Przedstawione w artykule wybrane obecnie stosowane rozwiązania pozwalają na zwiększenie trwałości podsypki kolejowej (jako osobne rozwiązania lub wykorzystanie ich przemysłanej koincydencji). Zalecane rozwiązania do stosowania w praktyce inżynierskiej można dostosować do aktualnego cyklu życia nawierzchni kolejowej:

1) na etapie projektowania, np. dobór właściwych parametrów przekładek podszynowych, USP czy UBM;

2) na etapie eksploatacji i utrzymania, np. podbijanie, uzupełnianie i oczyszczanie podsypki, chemiczna stabilizacja czy wymiana przekładek podszynowych (które ulegają szybkiej degradacji i najczęściej jako pierwsze zostają kwalifikowane do wymiany) na etapie wymiany

## Zastosowanie elementów sprężystych w nawierzchni wg ich sztywności [2]

*The use of elastic elements in the railway track structure according to their stiffness [2]*

Zastosowanie	Przekładki podszynowe		USP		UBM	
	sztywne	miękkie	sztywne	miękkie	sztywne	miękkie
Zmniejszenie ugięcia szyny	+		+			
Redukcja uszkodzeń podkładów		+				
Redukcja ruchów i drgań podkładów			+			
Obniżenie osiadania podsypki wskutek redukcji naprężeń				+	+	+
Obniżenie naprężeń przekazywanych na torowisko		+				
Redukcja sztywności toru		+		+		
Długa żywotność przytwierdzeń	+					
Redukcja degradacji podsypki				+	+	+
Obniżenie drgań w podkładzie i podsypce		+				
Zmniejszenie grubości podsypki			+		+	+

(naprawy głównej), np. stosowanie USP, UBM czy podkładów z tworzyw sztucznych.

### Literatura

[1] Bahrekazemi M. Train-induced ground vibration and its prediction. PhD thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, 2004.

[2] Sol-Sánchez M., Moreno-Navarro F., Rubio-Gámez M. C.: The use of elastic elements in railway tracks: A state of the art review. *Construction and Building Materials*. 2015; DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.11.027.

[3] Selig ET, Waters JM. *Track geotechnology and substructure management*. London: Thomas Telford; 1994. <https://doi.org/10.1680/tgasm.20139>.

[4] Prud' Homme A. *Ligne a Grande Vitesse Paris-Sud-Est*. Annales de l'Institut Technique du Batiment et des Travaux Publics. 1978; 366: 70 – 96.

[5] Shenton MJ. Deformation of railway ballast under repeated loading conditions. In: Press P, editor, *Railroad track mechanics and technology*. Oxford; 1978. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-021923-3.50025-5>.

[6] Kraśkiewicz C, Anysz H, Zbiciak A, Płudowska-Zagrajek M, Al Sabouni-Zawadzka A. Artificial neural networks as a tool for selecting the parameters of prototypical under sleeper pads produced from recycled rubber granulate. *Journal of Cleaner Production*. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136975>.

[7] Kraśkiewicz C, Zbiciak A, Al Sabouni-Zawadzka A, Piotrowski A. Resistance to severe environmental conditions of prototypical recycling-based under ballast mats (UBMs) used as vibration isolators in the ballasted track systems. *Construction and Building Materials*. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126075>.

[8] Morgan JGD, Markland E. The effect of vibration on ballast beds. *Géotechnique*. 1981; <https://doi.org/10.1680/geot.1981.31.3.367>.

[9] UIC (International Union of Railways) High Speed Department. *Design of New Lines for Speeds of 300–350 km/h, S, First Report*; 2001.

[10] Bednarek Wł. A. An influence of a generated track intentional irregularity on a static work of a railway track. *Archives of Civil Engineering*. 2021, DOI: 10.24425/ace.2021.136462.

[11] Bednarek Wł. Full-Scale Field Experimental Investigation on the Intended Irregularity of CWR Track in Vertical Plane. *Energies*, 2021, DOI: 10.3390/en14227477.

[12] Ishida M. The progress mechanism of track geometrical irregularity focusing on hanging sleepers. *International Journal of Railway Research*. 2015, Vol. 2, No. 1, 15 – 23.

[13] Bednarek Wł, Pawłowski M. Recykling starożytecznej podsypki tłuczniowej na warstwy ochronnej zapewniające trwałość podtorza podczas postępującej degradacji nawierzchni kolejowej. *Materiały Budowlane*. 2022; DOI: 10.15199/33.2022.10.25.

[14] PN-EN 13450:2004. *Kruszywa na podsypkę kolejową (EN 13450:2002) z późn. zmianą*.

[15] *Warunki techniczne wykonania i odbioru podsypki tłuczniowej naturalnej i z recyklingu stosowanej w nawierzchni kolejowej Id 110*. Warszawa 2016.

[16] Esveld C. *Modern Railway Track*. TU Delft, 2001.

[17] Grulkowski S, Kędra Z, Koc Wł, Nowakowski MJ. *Drogi szynowe*. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, 2013.

[18] Chudyba Ł. Trwałość podstawowych elementów nawierzchni kolejowej. *Materiały Budowlane*. 2017, DOI: 10.15199/33.2017.11.56.

[19] Bałuch M. Ustalanie dopuszczalnych nacisków osi i maksymalnych prędkości na liniach PKP. *Prace Centrum Naukowo-Technicznego Kolejnictwa*, z. 139, Warszawa 2003.

[20] Sołkowski J. Problemy obliczania wytrzymałości toru w świetle technicznych specyfikacji interoperacyjności I299/2014. *Zeszyty Naukowo-Techniczne SITK RP, Oddział w Krakowie, Nr 1 (112)*, 2017.

[21] Instrukcja Id-3: *Warunki techniczne utrzymania podtorza kolejowego*. PKP Polskie Linie Kolejowe S.A., Warszawa, 2009.

[22] Basiewicz T, Towpik K, Golaszewski A, Kukulski J. Odształcenia nawierzchni kolejowej z kompozytem tłuczniowym. *Problemy Kolejnictwa*. 2015, 166: 25 – 35.

[23] Krużyński M, Gisterek I. Stabilizacja chemiczna podsypki na liniach kolejowych. *Przeгляд Komunikacyjny*. 2009; 9/10: 36 – 39.

[24] Bedini-Jacobini F, Tutumluer E, Saat MR. Identification of High-Speed Rail Ballast Flight Risk Factors and Risk Mitigation Strategies. Rail Transportation and Engineering Center (RailTEC), University of Illinois at Urbana-Champaign, Department of Civil and Environmental Engineering, 10th World Congress on Railway Research, Sydney, Australia, 25 – 28 November 2013.

[25] Górak P, Postawa P.: Lekkie kruszywo ultrakompozytowe – ekologiczne i użyteczne wykorzystanie odpadów mineralnych i sztucznych. *Materiały Budowlane*. 2022. DOI: 10.15199/33.2022.06.08.

[26] Lenart S, Bizjak KF, Noren-Cosgriff K, Kaynia AM, Kramar M, Vajdić M, Chen K, Clarke J. Guidelines on the Use of Novel Construction and Maintenance Techniques within the Operational Railway Environment D4.1, DESTINATION RAIL – Decision Support Tool for Rail Infrastructure Managers, 2018

[27] Antolik Ł. Wpływ przekładki podszynowej na pracę systemu przytwierdzenia typu SB. *Problemy Kolejnictwa – Zeszyt 177 (grudzień 2017)*. DOI: 10.36137/1771p.

[28] Kraśkiewicz C, Zbiciak A, Oleksiewicz W, Karwowski W. Static and dynamic parameters of railway tracks retrofitted with under sleeper pads. *Archives of Civil Engineering*. 2018, DOI: 10.2478/ace-2018-0070.

[29] PN-EN 16730:2016. *Kolejnictwo – Tor – Podkłady o podłożu betonowe z podkładkami podpodkładowymi*.

[30] PN-EN 17282:2021. *Kolejnictwo – Infrastruktura – Maty podpodszynkowe*.

[31] Kraśkiewicz C, Zbiciak A, Wasilewski K, Al Sabouni-Zawadzka A. Laboratory Tests and Analyses of the Level of Vibration Suppression of Prototype under Ballast Mats (UBM) in the Ballasted Track Systems. *Materials*. 2021, <https://doi.org/10.3390/ma14020313>.

[32] Guerrieri M, Parla G. A new high-efficiency procedure for aggregate gradation determination of the railway ballast by means image recognition method. *Archives of Civil Engineering*. 2013, DOI: 10.2478/ace-2013-0025.

[33] Krużyński M, Piotrowski A. Badania zageszczalności materiałów podsypkowych. *Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej*, nr 41, Poznań, 1995, 241-252.

[34] Czyczuła Wł. *Możliwości przyspieszenia stabilizacji podsypki*. *Drogi Kolejowe*. 1989; nr 8: 158 – 162.

[35] Zand J, van 't, Moraal J.: *Ballast Resistance under Three Dimensional Loading*. Report 7-97-103-4, Roads and Railways Research Laboratory, TU Delft, April 1997, s. 1-9.

[36] Yin H, Gao L. Experimental and Numerical Investigation on Ballast Flight from Perspective of Individual Particles. *Applied Sciences*. 2020, DOI: 10.3390/app10010286.

[37] <https://www.geomatpolka.pl/produkty-katalog/geokrarty-geokomorki/>; (20.12.2022).

[38] [www.getzner.com](http://www.getzner.com) (Loy H.: Under Sleeper Pads: improving track quality while reducing operational costs. Reprinted from *European Railway Review*, Issue 4, 2008); (20.12.2022).

Przyjęto do druku: 26.07.2023 r.