

Prof. dr hab. inż. Tadeusz Basiewicz,
Prof. dr hab. inż. Kazimierz Towpik,
Dr inż. Andrzej Gołaszewski,
Dr inż. Jacek Kukulski
Politechnika Warszawska

NAWIERZCHNIA KOLEJOWA Z KOMPOZYTEM TŁUCZNIOWYM

SPIS TREŚCI

1. Wprowadzenie
2. Założenia teoretyczne konstrukcji nawierzchni z kompozytem tłuczniowym
3. Technologie zabudowy nawierzchni z kompozytem tłuczniowym
4. Zabudowa nawierzchni z kompozytem tłuczniowym na odcinku doświadczalnym
5. Badania parametrów kompozytu tłuczniowego
6. Badania parametrów toru w procesie eksploatacji
7. Propozycja zabudowy nawierzchni z kompozytem tłuczniowym na odcinku badawczym
8. Podsumowanie

STRESZCZENIE

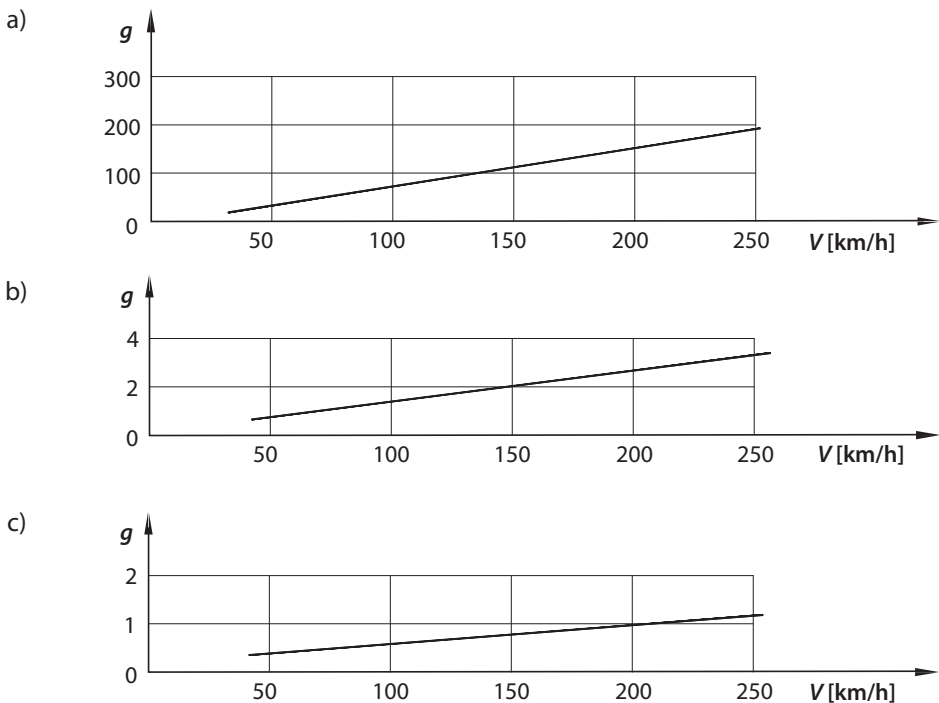
Potrzeba ograniczenia kosztów utrzymania nawierzchni kolejowej skłania do poszukiwania rozwiązań umożliwiających wydłużenie okresów między naprawami. Podano wyniki badań nawierzchni z warstwą podsypki zbrojonej geosiatkami oraz stabilizowanej żywicą. Przedstawiono technologię układania kilku wariantów nowej nawierzchni na odcinku Centralnej Magistrali Kolejowej oraz wyniki oceny stanu toru na odcinkach doświadczalnych.

1. WPROWADZENIE

Realizowany w Polsce program modernizacji linii kolejowych zakłada podwyższenie prędkości pociągów do 160 km/h. W zamierzeniach rozwojowych przewiduje się budowę nowej linii dla dużych prędkości z $V = 250\text{--}300$ km/h. Powstaje pytanie, czy stosowanie klasycznej nawierzchni kolejowej z podsypką tłuczniową jest racjonalnym rozwiązaniem przy dużych prędkościach.

Koleje francuskie kontynuują budowę linii dużych prędkości z nawierzchnią klasyczną. Koleje niemieckie stwierdziły znaczny wzrost kosztów utrzymania nawierzchni z warstwą podsypki i z tego względu na liniach dużych prędkości zastosowano na skalę eksploatacyjną rozwiązania niekonwencjonalne [5, 7, 15].

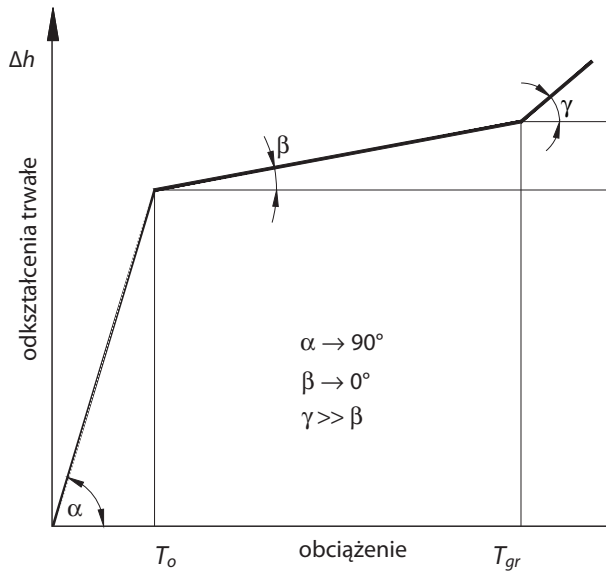
Klasyczne nawierzchnie kolejowe, które mają ruszt torowy składający się z szyn i podkładów zanurzonych w warstwie podsypki leżącej na podtorzu, pracują pod obciążeniem eksploatacyjnym w stadium sprężysto-plastycznym. Źródłem trwałych odkształceń plastycznych jest podsypka. Współczesne możliwości technologiczno-materiałowe zapewniają pod obciążeniem eksploatacyjnym pracę podtorza w stanie sprężystym [3, 11]. Również szyny i podkłady pracują w stadium sprężystym. Najslabszym elementem klasycznej konstrukcji drogi kolejowej jest więc mechanicznie zagęszczona warstwa tłucznia. Wykonano dziesiątki prac badawczych dotyczących jakości i rodzaju oraz składu ziarnowego tłucznia [8, 15], a także liczne prace na temat sposobu mechanicznego zagęszczania podsypki [4, 6, 7]. Pomimo tego nie osiągnięto zmniejszenia intensywności narastania nierównomiernych, trwałych odkształceń podsypki. W konsekwencji zachodzi więc potrzeba systematycznych i częstych napraw usuwających powstałe niedopuszczalne nierówności geometryczne toru.



Rys. 1. Pomierzone przyśpieszenia w częściach składowych nawierzchni [1]:
a) szyny, b) podkłady betonowe, c) podsypka

W ujęciu modelowym, styk koła z szyną stanowi generator energii, która jest transmitowana przez szynę i przytwierdzenie szyny do podkładu i dalej przez warstwę podsypki do podtorza. Powstaje pole intensywnej wibracji. Energia kinetyczna wzrasta wraz ze wzrostem prędkości pociągów, a wskutek tego zwiększają się również przyśpieszenia szyn, podkładów, podsypki i podtorza (rys. 1).

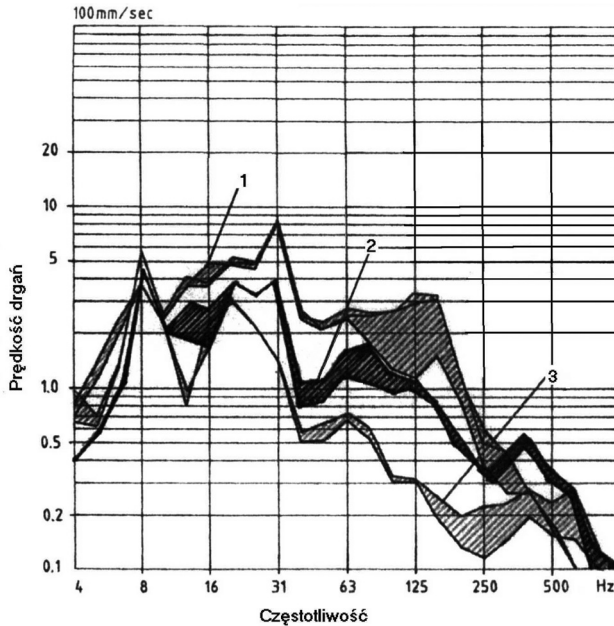
Pole wibracji w podsypce przekracza kilkakrotnie przyśpieszenie g . Należy więc oczekiwać, że w podsypce wystąpią obszary poddane obciążeniom rozciągającym, które będą naruszać istniejącą równowagę sił tarcia wewnętrznego, dekonsolidujących podsypkę. Nieuniknione jest więc osiadanie podsypki (odkształcenie plastyczne); przy tym rośnie ono wraz ze wzrostem naprężeń pod podkładem oraz ze wzrostem przyśpieszeń drgań. Osiadanie jest więc sumaryczną miarą mikroprocesów plastycznych zachodzących w podsypce (rys. 2).



Rys. 2. Resurs eksploatacyjny podsypki

Zastosowanie miękkich przekładek podszytowych w przytwierdzeniu¹ zmniejsza w istotny sposób szybkość drgań przenoszonych przez podsypkę. Fakt ten dobrze ilustrują badania [3], które pokazały, że w zakresie częstości drgań: 4–125 Hz, przy dwudziestokrotnym zmniejszeniu sztywności przekładek, szybkość drgań zmniejszyła się kilkakrotnie (rys. 3).

² Według PN-EN 13481-2 – Kolejnictwo – Tor – Wymagania eksploatacyjne systemów przytwierdzeń. Część 2: Systemy przytwierdzeń do podkładów betonowych: przekładki miękkie – sztywność dynamiczna < 100 MN/m; twarde – sztywność dynamiczna \geq 200 MN/m.



Rys. 3. Wpływ zmiany sztywności przekładek na prędkość drgań w podsypce (pomiar wykonany w podsypce na głębokości 5–10 cm pod podkładem; prędkość pociągu 250 km/h) [4].
 Nawierzchnia klasyczna; szyny 60E1, podkłady B 70: 1) przekładki Zw 687a (500 kN/mm), 2) przekładki Zw 700 (60 kN/mm), 3) przytwierdzenia sprężyste, przekładki o sztywności 27 kN/mm

Analiza naprężeń w podłożu szynowym pokazuje, że naprężenia rozciągające zanikają w podłożu szynowym dopiero na głębokości 60–80 cm [1]. Warstwa tłucznia poddawana jest więc wpływom naprężeń rozciągających. Ponadto wibracje wywołują w warstwie podsypki przyspieszenie kilkakrotnie przewyższające wartość przyspieszenia ziemskiego g , co dodatkowo obniża odporność podsypki na przenoszenie naprężeń rozciągających. Wibracja obniża nośność zagęszczonego tłucznia, wywołując dekonsolidację.

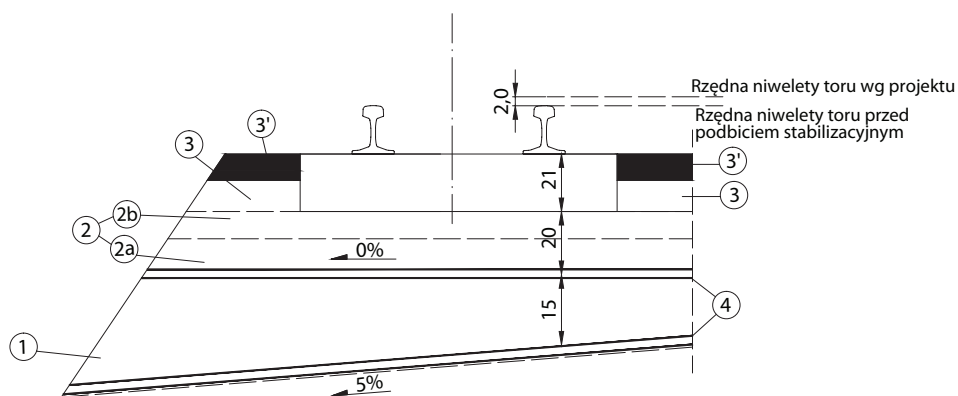
Współczesna nawierzchnia kolejowa powinna pracować pod obciążeniem eksploatacyjnym w stadium sprężystym. Można to uzyskać przez eliminację warstwy podsypki z konstrukcji nawierzchni kolejowej, wprowadzając w to miejsce płytę z betonu zbrojonego albo wykonując zabiegi technologiczno-konstrukcyjne, podwyższające odporność na dekonsolidację warstwy tłuczniowej.

2. ZAŁOŻENIA TEORETYCZNE KONSTRUKCJI NAWIERZCHNI Z KOMPOZYTEM TŁUCZNIOWYM

Warstwa tłucznia na poziomie kontaktu podkładu z podsypką pod obciążeniem użytkowym znajduje się w przestrzennym stanie naprężeń ściskających. Tensor naprężeń głównych opisuje zależność: $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3 > 0$. Oznacza to, że tłuczeń znajduje się w trój-

osiowym stanie ściskania, a zatem są tu najlepsze warunki pracy podsypki. Najniekorzystniejsze warunki występują tam, gdzie podsypka jest poddawana pulsującym naprężeniom rozciągającym. Szczegółowa analiza pokazuje, że naprężenia rozciągające w podsypce powstają w obszarach zbliżonych do miejsca przytwierdzenia szyny do podkładu (miejsca przekazywania obciążeń koło – podkład – podsypka) oraz w obszarach za czołem podkładów. Górna warstwa podsypki w tych obszarach wymaga uodpornienia na zagrożenia dekonsolidacją. Dekonsolidacja oznacza rozgęszczenie tłucznia, co powoduje zwiększenie jego objętości. Zapobieganie powiększaniu objętości pryzmy tłuczniowej jest warunkiem koniecznym do ograniczenia zjawiska dekonsolidacji. W tym celu proponuje się zastosowanie kompozytu tłuczniowego, stanowiącego warstwę tłucznia uzbrojoną geosiatkami i dodatkowo stabilizowaną chemicznie, zgodnie z dalej opisanymi zasadami.

Nawierzchnia kolejowa z kompozytem tłuczniowym charakteryzuje się tym, że zapewni jednocześnie mechaniczne i chemiczne uodpornienie warstwy podsypki na zjawisko dekonsolidacji. Mechaniczne uodpornienie polega na uzbrojeniu podsypki dwiema geosiatkami. Pierwsze, dolne zbrojenie stanowi geosiatka lub geowłóknina ułożona na styku podsypki z górną warstwą podtorza (rys. 4). Po ułożeniu i zagęszczeniu pierwszej warstwy tłucznia 1 jest układane drugie, górne zbrojenie geosiatką.

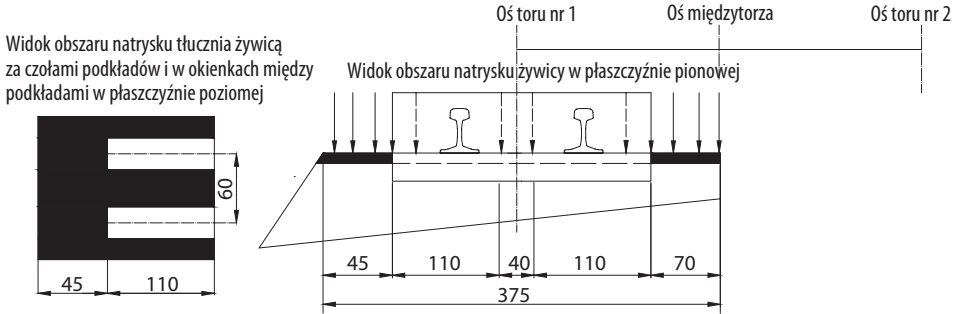


Rys. 4. Schemat konstrukcji kompozytu tłuczniowego: 1) dolna warstwa tłucznia w stanie zagęszczonym około $0,95 \text{ m}^3/1 \text{ m}$ toru, 2) górna warstwa tłucznia o objętości w stanie zagęszczonym około $0,95 \text{ m}^3/1 \text{ m}$ toru, 3) warstwa tłuczniowa o objętości w stanie zagęszczonym około $0,40 \text{ m}^3/1 \text{ m}$ toru, w której jest zatopiona rama toru, 3') pokrycie warstwę tłuczniową stabilizowaną chemicznie, geosiatki

Po utworzeniu podwarstwy tłucznia 2a następuje jej zagęszczenie odpowiednio dobranym sprzętem. Na tej warstwie jest układana rama toru i zasypywana tłuczniem w ilości odpowiadającej objętości drugiej półwarstwy 2b. Podniesienie ramy toru i podbicie podbijką automatyczną zapewnia zabudowę i zagęszczenie półwarstwy 2b.

Po uzupełnieniu warstwy tłucznia do standardowego kształtu 3, wykonuje się wagonem stabilizacyjnym powierzchnię stabilizację dynamiczną podsypki. W końco-

w tej fazie wykonuje się przez natrysk stabilizację chemiczną tłucznia specjalnym spoiwem na bazie żywic duromerowych [9]. Natrysk wykonuje się w obszarach narażonych na intensywne drgania (rys. 5).



Rys. 5. Obszar natrysku tłucznia żywicą

Penetracja spoiwa powinna sięgać do głębokości nie przekraczającej połowy wysokości podkładu (80 mm), aby umożliwić jej rozkruszenie łapami wibracyjnymi podbijarki w przypadku konieczności regulacji położenia toru w okresie eksploatacji. W ten sposób powstaje powłoka, która ogranicza możliwość powiększania się objętości tłucznia w strefach narażonych na dekonsolidację.

Ziarna tłucznia po jego zagęszczeniu, wnikają w oczka geosiatki, zapewniając mechaniczne zakotwienie kruszywa. Siatki ujednocniają strukturę pryzmy tłucznia i zwiększają kąt tarcia wewnętrznej podsypki. Ograniczeniu deformacji warstwy tłuczniowej sprzyja dobre klinowanie się ziaren tłucznia. Uzyskuje się to przez dobór wymiarów i układu ziaren w strukturze tłucznia. Warunki te spełnia tłuczeń określony w [14] jako klasa 1, gatunek 1 (masa ziaren przechodzących przez sito o wymiarach oczek: 63 mm – 100%, 31,5 mm \leq 20%, 22,4 mm \leq 3%, mniejszych od 0,5 \leq 1%, zawartość pyłów – cząstek mniejszych od 0,063 mm \leq 0,5%, nasiąkliwość \leq 0,5, mrozoodporność \leq 1,0%, rozkruszalność badana metodą Los Angeles \leq 12%, odporność na zgorzel słoneczną \leq 5%).

Badania skuteczności scalenia warstwy tłucznia żywicami [10] wykazały, że wytrzymałość tej warstwy na zginanie zależy od zapylenia ziaren tłucznia. Wynika z tego, iż tłuczeń przed aplikacją żywicy musi być wypłukany i wysuszony (pozbawiony zawartości pyłów). Zawartość pyłów w tłuczniu, tzn. cząstek mniejszych od 0,063 mm, powinna być ograniczona do 0,07–0,18%. Z wielu proponowanych przez producentów materiałów wzmacniających, mających atest CNTK, do przeprowadzenia badań porównawczych na odcinkach doświadczalnych wybrano:

- geosiatki:
 - FORNIT 40×40 i FORTRAC 80×80, firmy Huesker,
 - SSLA 30 i Tx 160 firmy TENSAR o wytrzymałości na rozzerwanie 20–30 kN/m², i odkształceniu 2% pod wpływem siły 7–11 kN/m,

- geowłókninę – COMTRAC 50×50 firmy Huesker o wytrzymałości na rozciąganie 1,9–4,9 kN/m² i wydłużeniu 30% przy maksymalnym obciążeniu pasma.

Szerokość zastosowanych materiałów wynosi 3,80 m. Wybór żywicy stabilizującej górną, przypowierzchniową warstwę tłucznia poprzedzono badaniami laboratoryjnymi [10] i spośród dostępnych preparatów wybrano żywicę MC-Ballastbond 70, przenoszącą naprężenia rozciągające przy zginaniu od 0,015 MPa do 0,600 MPa. Żywica ta skleja ziarna tłucznia punktowo (pozostawiając pory do przepływu wody opadowej), jest niepalna, osiąga stan stały w ciągu doby, mimo zespolenia ziaren tłucznia zapewnia możliwość mechanicznego podbijania toru oraz użyteczność zespolonego tłucznia w procesie dalszej eksploatacji.

3. TECHNOLOGIE ZABUDOWY NAWIERZCHNI Z KOMPOZYTEM TŁUCZNIOWYM

Zabudowa nawierzchni z kompozytem tłuczniowym poddawanych badaniom wymaga:

- usunięcia starej nawierzchni (szyn, podkładów i tłucznia),
- zabudowy dolnego i górnego zbrojenia kompozytu tłuczniowego,
- zabudowy i zagęszczenia warstw tłucznia,
- ułożenia ramy nowego toru (szyny i podkłady),
- oprofilowania,
- stabilizacyjnego podbicia i zagęszczenia przyzmy tłucznia,
- zespolenia żywicą wierzchniej warstwy tłucznia.

Wymienione prace można wykonać według dwóch technologii:

A – z wykorzystaniem sprzętu budowlanego (spychacze, samobieżne walce gładkie, samochody wywrotki) – po zdjęciu starego toru;

B – z wykorzystaniem maszyny AHM i pociągu wyposażonego w transportery – pod ramą nowego toru.

Poprawna zabudowa nawierzchni kolejowej z kompozytem tłuczniowym według technologii **A**, wymaga uwzględnienia w projekcie organizacji budowy odcinka doświadczalnego następujących czynności:

- 1) zdjęcie starej nawierzchni,
- 2) usunięcie starej podsypki tłuczniowej,
- 3) wykonanie wymiany istniejącego gruntu podtorza na głębokości 30 cm,
- 4) wykonanie pomiarów i odbioru podłoża pod względem równości podłużnej i poprzecznej oraz modułu odkształcenia podtorza, mierzonego na torowisku,
- 5) rozłożenie geosiatki stanowiącej uzbrojenie dolnej warstwy tłucznia,
- 6) dowóz tłucznia na dolną warstwę w dwóch półwarstwach o objętości około 0,95 m³/1 m toru,
- 7) zagęszczenie dolnej warstwy tłucznia w dwóch półwarstwach,

- 8) dokonanie odbioru dolnej, zagęszczonej warstwy tłucznia z pomiarem równości podłużnej i poprzecznej oraz modułu odkształcenia tej warstwy,
- 9) rozłożenie geosiatki stanowiącej uzbrojenie górnej, zagęszczonej warstwy tłucznia,
- 10) dowóz tłucznia na półwarstwę 2b (część warstwy górnej – rysunek 4) o objętości około $0,38 \text{ m}^3/1 \text{ m}$ toru w dwóch półwarstwach,
- 11) zagęszczenie półwarstwy tłucznia 2a (części warstwy górnej),
- 12) dokonanie odbioru zagęszczonej (części warstwy górnej) półwarstwy tłucznia 2a z pomiarem równości podłużnej i poprzecznej oraz modułu odkształcenia,
- 13) zabudowa podkładów i szyn (ramy torowej),
- 14) zasypywanie ramy torowej tłuczniem o objętości około $0,21 \text{ m}^3/1 \text{ m}$ toru transportowanym wagonami dozatorami po nowo ułożonym torze,
- 15) podbicie, regulacja toru oraz przejazd stabilizatorem dynamicznym (DGS),
- 16) uzupełnienie tłucznia według potrzeb i oprofilowanie pryzmy tłuczniowej do normatywnych wymiarów,
- 17) odbiór techniczny toru z pomiarami przewidzianymi warunkami odbioru sprecyzowanymi w Id-1 (D1) [16] oraz ewentualne usunięcie usterek,
- 18) podbicie stabilizacyjne toru po przeniesieniu obciążenia $0,6 T_g$,
- 19) zagęszczenie pryzmy tłuczniowej wagonem stabilizatorem,
- 20) natrysk wierzchniej warstwy pryzmy tłuczniowej – około $1,3 \text{ m}^3/100 \text{ m}$ toru (rys. 5) w miejscach powierzchniowego zagęszczenia pryzmy tłuczniowej,
- 21) ostateczny odbiór wybudowanego odcinka doświadczalnego (pierwszy pomiar parametrów umożliwiających dokonanie oceny konstrukcji nawierzchni z kompozytem tłuczniowym i rozpoczęcie naliczania obciążeń toru na odcinku doświadczalnym).

Wymienione czynności:

- 1) zdjęcie starej nawierzchni,
- 2) usunięcie starej podsypki,
- 13) zabudowa podkładów i szyn,
- 17) odbiór techniczny toru,
- 18) podbicie stabilizacyjne toru,
- 21) ostateczny odbiór wybudowanego odcinka.

Czynności te powinny być wykonane znanymi, powszechnie stosowanymi sposobami, nie wymagającymi omówienia – należy je uwzględnić w projekcie organizacji budowy odcinka doświadczalnego.

Zabudowa nawierzchni kolejowej z kompozytem tłuczniowym (rysunek 4) według technologii **B**, wymaga uwzględnienia w projekcie organizacji budowy następujących czynności:

- 1) usunięcie podsypki tłuczniowej za pomocą oczyszczarki AHM z załadunkiem na pociąg do transportu wysiewek,
- 2) zagęszczenie istniejącego podtorza za pomocą wieloczynnościowej maszyny AHM z pomiarem modułu odkształcenia,

- 3) dokonanie odbioru zagęszczonego podtorza z pomiarem równości podłużnej i poprzecznej oraz modułu odkształcenia,
- 4) rozścielenie dolnej warstwy zbrojenia (geosiatki, geowłókniny) na istniejącym podtorzu za pomocą maszyny AHM,
- 5) wyładunek z wagonów hopper-dozatorów nowego tłucznia (płukanego wodą) na warstwę 1 o objętości odpowiadającej warstwie tłucznia o grubości 12 cm po zagęszczeniu,
- 6) wbudowanie tłucznia maszyną AHM,
- 7) zagęszczenie wbudowanego tłucznia warstwy 1 maszyną AHM z pomiarem modułu odkształcenia,
- 8) wykonanie odbioru zagęszczonego tłucznia warstwy 1 z pomiarem równości podłużnej i poprzecznej oraz modułu odkształcenia,
- 9) rozścielenie górnej warstwy zbrojenia (geosiatki, geowłókniny) na zagęszczonej warstwie 1 tłucznia maszyną AHM.
- 10) wyładunek z wagonów hopper-dozatorów nowego tłucznia (płukanego wodą) na warstwę 2a o objętości odpowiadającej warstwie tłucznia o grubości 15 cm po zagęszczeniu,
- 11) wbudowanie tłucznia maszyną AHM,
- 12) zagęszczenie wbudowanego tłucznia warstwy 2a maszyną AHM z pomiarem modułu odkształcenia,
- 13) dokonanie odbioru zagęszczonego tłucznia warstwy 2a z pomiarem równości podłużnej i poprzecznej oraz modułu odkształcenia,
- 14) wyładunek z wagonów hopper-dozatorów nowego tłucznia (płukanego wodą) na warstwę 2b o objętości odpowiadającej warstwie tłucznia o grubości 10 cm po zagęszczeniu i 50% tłucznia na warstwę 3,
- 15) podbicie i regulacja toru podbijarką torową,
- 16) uzupełnienie tłucznia według potrzeb i oprofilowanie pryzmy tłuczniowej do normatywnych wymiarów,
- 17) zagęszczenie podsypki stabilizatorem dynamicznym (DGS),
- 18) odbiór techniczny toru z pomiarami przewidzianymi warunkami odbioru sprecyzowanymi w Id-1 (D1) [16] oraz ewentualnie usunięcie usterek,
- 19) przeniesienie przez tor obciążenia około 600 tys. ton brutto,
- 20) podbicie stabilizacyjne toru (po około 22 dniach),
- 21) zagęszczenie pryzmy tłuczniowej stabilizatorem dynamicznym (DGS),
- 22) natrysk wierzchniej warstwy pryzmy tłuczniowej w miejscach oznaczonych na rysunku 5,
- 23) ostateczny odbiór wybudowanego odcinka doświadczalnego (pierwszy pomiar parametrów umożliwiających dokonanie oceny konstrukcji nawierzchni z kompozytem tłuczniowym i rozpoczęcie naliczania obciążeń toru na odcinku doświadczalnym.

Kolejność przejść wiodącej maszyny AHM w procesie budowy nawierzchni z kompozytu tłuczniowego przedstawiono na rysunku 6.

Lp.	Czynności budowy	Sektor I	Sektor II	Sektor III
1	Usunięcie podsypki tłuczniowej	1	1	1
2	Zagęszczenie istniejącego podtorza, pomiar modułów (statyczny, dynamiczny) i równość podtorza			2
3	Usunięcie istniejącego gruntu na głębokość 30 cm	3	3	
4	Zagęszczenie odsłoniętego podtorza, pomiar modułów (statyczny, dynamiczny) i równość podłoża	4	4	
5	Wbudowanie materiału na wzmocnioną warstwę podtorza	5	5	
6	Zagęszczenie wzmocnionej warstwy podtorza z pomiarem modułów (statyczny i dynamiczny) i równości podłoża	6	6	
7	Rozścielenie dolnej warstwy zbrojenia na podtorzu	7	7	
8	Wbudowanie tłuczni na 1 warstwę	8	8	
8.1	Wbudowanie całej przyny tłuczni			8.1
9	Zagęszczenie wbudowanego tłuczni na 1 warstwę, pomiar modułów (statyczny i dynamiczny) i równości podłoża	9	9	
10	Rozścielenie górnej warstwy zbrojenia na 1 warstwie tłuczniowej	10	10	
11	Wbudowanie tłuczni na warstwę 2a	11	11	
12	Zagęszczenie wbudowanego tłuczni warstwy 2a, pomiar modułów (statyczny i dynamiczny) i równości podłoża	12	12	

Rys. 6. Schemat kolejności przejść maszyny AHM podczas budowy odcinka doświadczalnego nawierzchni z kompozytu tłuczniowego

4. ZABUDOWA NAWIERZCHNI Z KOMPOZYTEM TŁUCZNIOWYM NA ODCINKU DOŚWIADCZALNYM

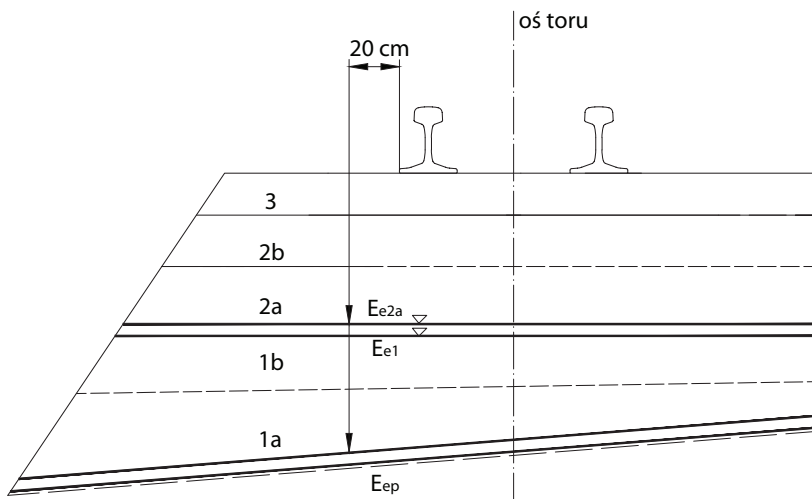
Odcinek doświadczalny nawierzchni kolejowej z kompozytem tłuczniowym zlokalizowano na Centralnej Magistrali Kolejowej. Ze względu na miejscowe uwarunkowania, w celu wykonania odcinka zastosowano technologię B z wykorzystaniem maszyny AHM. Maszyna ta daje możliwość wybudowania w jednym przejściu gruntu z warstwy istniejącego podtorza i zagęszczenia podtorza, a w drugim przejściu zabudowy war-

stwy nowego tłucznia, jej zagęszczenia oraz mechanicznej zabudowy geosiatek stanowiących zbrojenie kompozytu. Odcinek doświadczalny podzielono na cztery sektory oraz działki oznaczone na rysunku 7.

Nawierzchnia	Szyba 60E1, podkład PS 94 SB												
Kilometraż	170,875	171,275	171,675	172,150	172,175	172,575	172,975	173,325	173,325	174,025	174,050	175,050	
	1275 m			1150 m						700 m		1000 m	
	400 m	400 m	475 m	400 m		400 m		350 m					
Podsyпка	2 siatki FORNIT (40x40)	2 geowłók. COMTRAC i FORTROCK		2 siatki TENSAR	2 siatki FORNIT (40x40)	2 geowł.	2 siatki (Tx160, SSLA 30)		Bez siatek Bez natrysku ODCINEK PORÓWNAWCZY		ODCINEK PORÓWNAWCZY		
	Z ŻYWICĄ MC-Ballastbond			BEZ ŻYWICY MC-Ballastbond									
Podtorze	Podtorze istniejące bez wzmocnienia			Wzmocnienie górnej warstwy podtorza warstwą grubości 30 cm niesort frakcja 0-31,5						Podtorze istniejące z warstwą niesortu		Podtorze istniejące	
Działki	I1	I2	I3	II1	II2	II3		III		IV			
	SEKTOR I			SEKTOR II			SEKTOR III			SEKTOR IV			

Rys. 7. Odcinek doświadczalny z nawierzchnią zbudowany na CMK w 2008 roku

Wysoką jakość robót zabudowy nawierzchni na odcinkach doświadczalnych potwierdzono staranną i udokumentowaną kontrolą: pochylenia poprzecznego, równości podłużnej i poprzecznej powierzchni torowiska i poszczególnych warstw tłucznia oraz grubości warstw kompozytu. W procesie zabudowy kompozytu tłuczninowego zwrócono szczególną uwagę na uzyskanie pożądanego statycznego modułu odkształcenia podłoża. Zgodnie z normą [13], pomiary modułu wykonywano w 6 punktach przekrojów kompozytu, położonych w odstępach co 50 m (rys. 8).



Rys. 8. Miejsca pomiaru modułów odkształcenia podłoża

Natrysk żywicą wierzchniej warstwy tłucznia płukanego bez zapylenia (rys. 5) jest wykonywany dyszami aparatu ciśnieniowego, jako ostatnia czynność procesu technologicznego budowy nawierzchni z kompozytem tłuczniowym. Iniekcji dokonuje się przez natrysk żywicy dyszami aparatu ciśnieniowego. Skuteczność scalenia tłucznia żywicami w dużej mierze zależy od jego wilgotności, wilgotności otaczającego powietrza oraz temperatury tłucznia i powietrza. Za optymalne warunki uznano temperaturę w granicach 15–25°C [10].

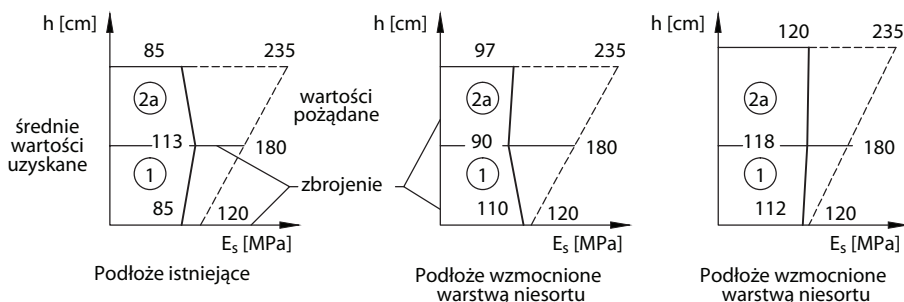
Przeprowadzone badania [10] wykazały, że aby uzyskać warstwę o grubości 8 cm w optymalnych warunkach wykonawstwa, należy użyć około 0,8 kg/m² żywicy MC-Ballast-bond 70, a dla warstwy o grubości 11 cm około 1,3 kg/m². Zastosowane technologie zabudowy nawierzchni na poszczególnych sektorach i działkach przedstawiono na rysunku 9.

5. BADANIA PARAMETRÓW KOMPOZYTU TŁUCZNIOWEGO

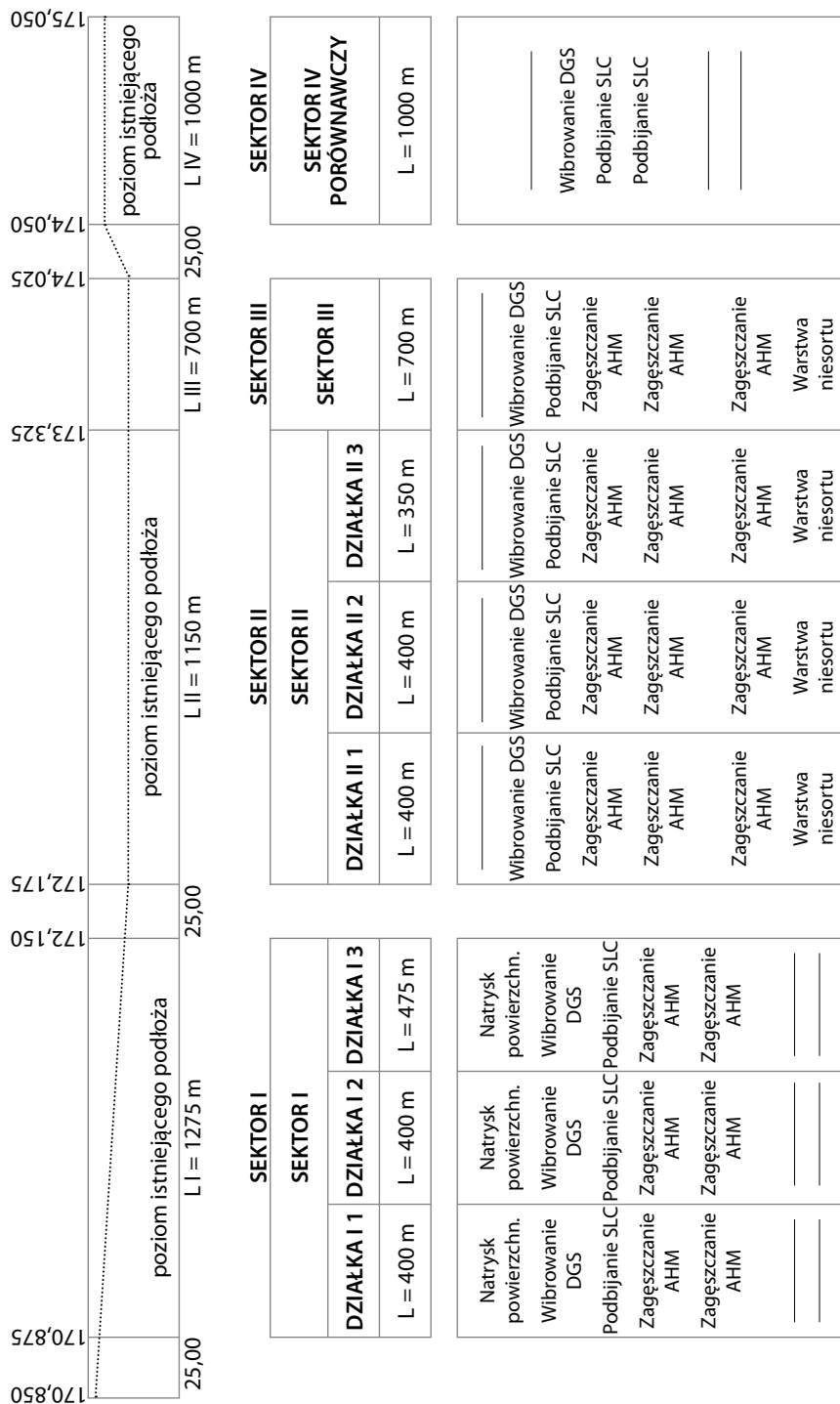
Wartości uzyskanych statycznych modułów odkształcenia podtorza i warstw tłucznia na poszczególnych sektorach i działkach przedstawiono na rysunku 10.

W wyniku zastosowanej technologii uzyskano wartości modułu statycznego odkształcenia podtorza 110–120 MPa, a więc zbliżone do pożądanych wartości (120 MPa) w sektorach z podtorzem wzmocnionym warstwą niesortu o grubości 30 cm, natomiast na sektorach z podtorzem niewzmocnionym, pomimo wykonanego zagęszczenia, pożądaną wartość nie uzyskano, gdyż osiągnięto tylko 85 MPa.

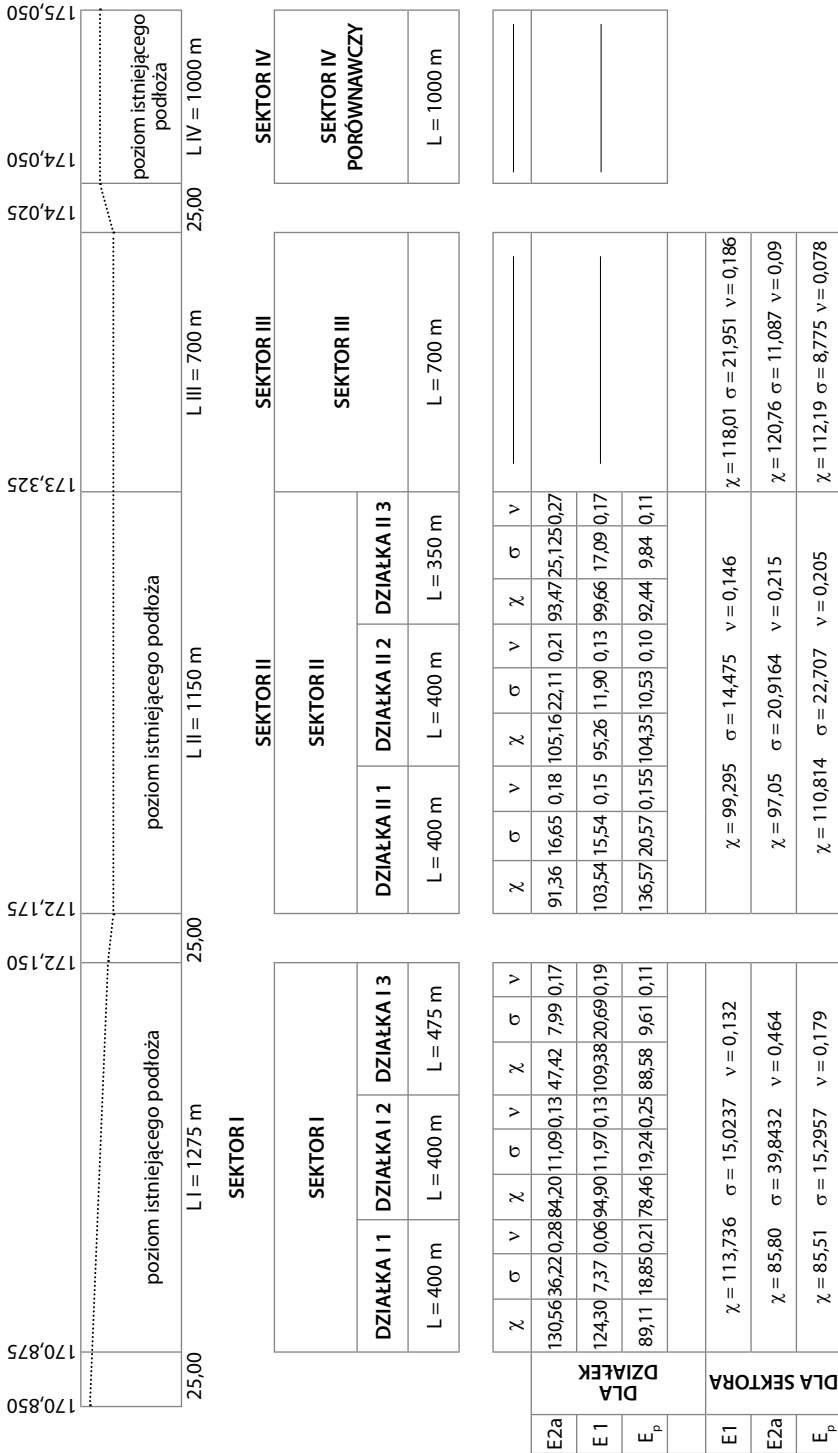
Zastosowana technologia zabudowy warstw kompozytu tłuczniowego nie zapewniła pożądaných, określonych metodą DORNI [17] wartości statycznych modułów odkształcenia poszczególnych warstw tłucznia. Zaobserwowano istotnie mniejsze (na poziomie istotności 0,1) wartości statycznych modułów odkształcenia warstw tłucznia zbrojonych geosiatkami (113; 85 MPa i 90; 97 MPa) wobec wartości dla tłucznia niezbrojonego 118–120 MPa (rys. 11). Zmniejszenie modułów odkształceń wynikało prawdopodobnie z niepełnego przylegania warstw tłucznia rozdzielonego geosiatką.



Rys. 11. Średnie wartości modułów odkształcenia poszczególnych warstw (E_s – statyczny moduł odkształcenia, h – głębokość pomiaru)



Rys. 9. Technologie zabudowy nawierzchni na poszczególnych sektorach i działkach



Rys. 10. Zestawienie wartości statycznych modułów odkształcenia podłoża

Zmniejszenie modułów odkształceń wynikało prawdopodobnie z niepełnego przylegania warstw tłucznia rozdzielonego geosiatką. Mniejsze wartości modułu odkształcenia warstwy tłucznia zbrojonego nie dyskwalifikują rozwiązania. Zbrojenie geosiatkami przeciwdziała przemieszczaniu ziaren tłucznia i w procesie eksploatacji może okazać się, że nawierzchnia z kompozytem tłuczniowym będzie ulegać mniejszym i jednorodnym deformacjom. Niezależnie od tego, dokładniejszego zbadania w przyszłości wymaga określenie wpływu zbrojenia tłucznia geosiatkami (dobór grubości warstw sprzętu do zagęszczania) na zagęszczenie kompozytu tłuczniowego. W tym celu wskazana byłaby zabudowa nawierzchni z kompozytem tłuczniowym w technologii A, polegająca na zagęszczaniu warstw tłucznia zbrojonego geosiatkami przy wykorzystaniu samobieżnych walców gładkich. Syntetyczne wskaźniki oceny toru, uzyskane na podstawie pomiaru toru drezyną pomiarową EM-120 po wykonaniu robót, przedstawiono w tablicy 1.

Tablica 1

Wskaźniki syntetyczne stanu toru nr 1

Działki / sektory	I 1	I 2	I 3	II 1	II 2	II 3	III	IV
Wskaźnik syntetyczny J	0,79	0,76	0,77	1,08	0,74	0,88	0,78	1,31

6. BADANIA PARAMETRÓW TORU W PROCESIE EKSPLOATACJI

Badania położenia geometrycznego toru podczas eksploatacji poprzedzono analizą wyników pomiarów, zebranych podczas kontroli jakości wykonywania poszczególnych czynności budowy toru na odcinku doświadczalnym [2]. Zasadniczym celem pomiarów geometrycznego położenia toru na odcinkach z nawierzchnią z kompozytem tłuczniowym, była ocena jej odkształcalności w czasie eksploatacji w porównaniu z nawierzchnią klasyczną.

Ogólna ocena położenia geometrycznego toru na odcinkach doświadczalnych, dokonana na podstawie pomiarów bezpośrednich toromierzem samorejestrującym, pomiarów geodezyjnych oraz pomiarów drezyną EM 120, wykazała że tor po zakończeniu robót odpowiadał warunkom określonym dla prędkości jazdy 200 km/h. Do oceny odkształcalności nawierzchni wykorzystano wyniki pomiarów objazdów drezyną EM-120 wykonanych w okresie obserwacji.

Analizowano zmiany wskaźnika syntetycznej oceny stanu toru oraz odchyleń standardowych nierówności pionowych i poziomych, pośrednio charakteryzujących odkształcenia warstwy podsypki. Zwiększenie wartości odchyleń standardowych nierówności pionowych wskazuje na wzrost nadwyżek dynamicznych oddziaływań pojazdów,

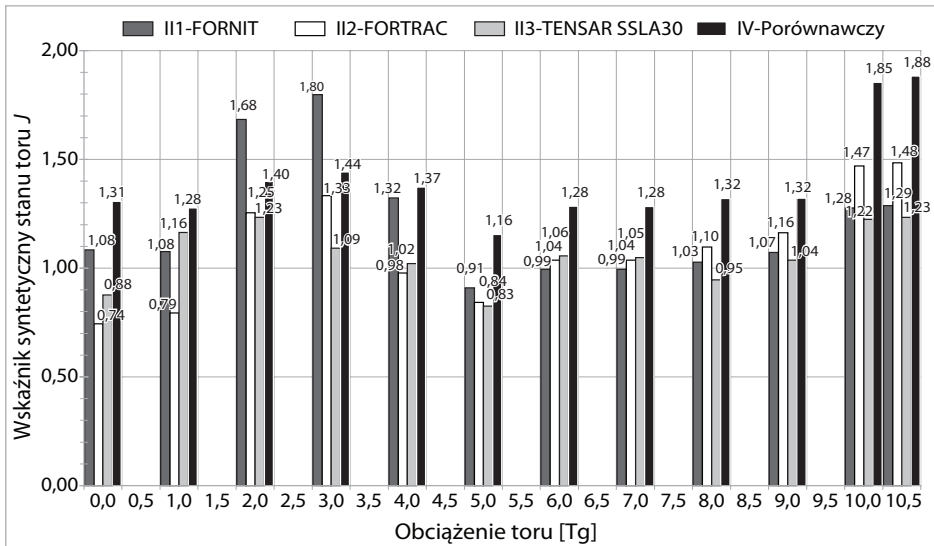
a zmiany odkształceń poziomych toru świadczą o zmianach położenia toru w płaszczyźnie poziomej i pośrednio o jego odporności na przemieszczenia poprzeczne. Wartości syntetycznych wskaźników stanu toru J obliczono na podstawie znajomości odchyłań standardowych poszczególnych parametrów toru zgodnie ze wzorem:

$$J = \frac{S_z + S_y + S_w + 0,5S_e}{3,5}, \quad (1)$$

gdzie:

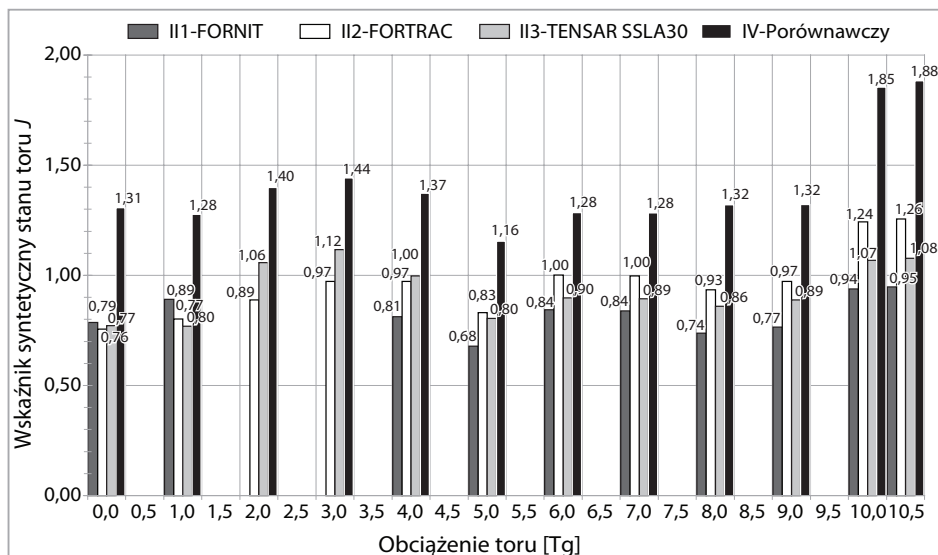
- S_z – odchylenie standardowe nierówności pionowych,
- S_y – odchylenie standardowe nierówności poziomych,
- S_w – odchylenie standardowe wichrowatości toru,
- S_e – odchylenie standardowe szerokości toru.

Na rysunkach 12 i 13 zestawiono wartości wskaźników syntetycznych J .



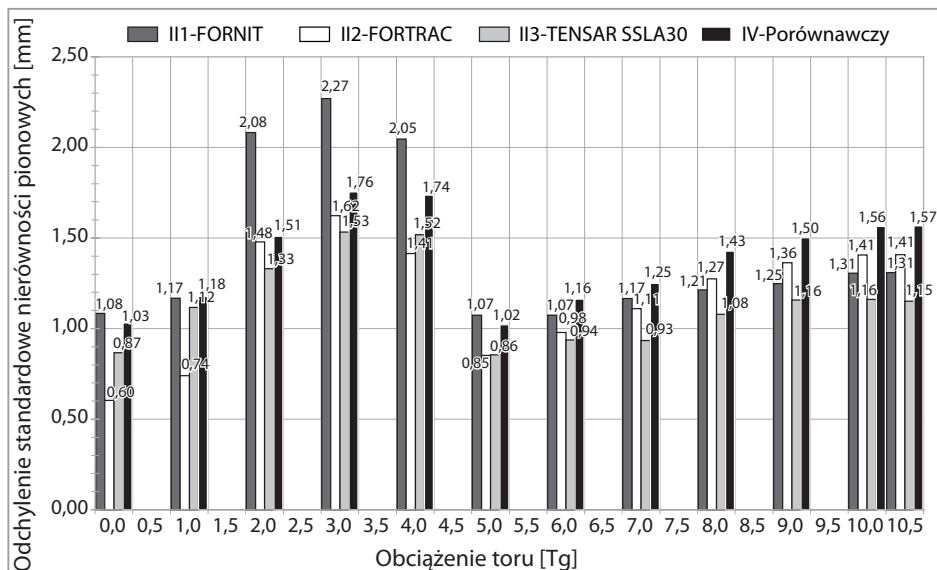
Rys. 12. Wartości wskaźników syntetycznych J dla działek z podtorzem istniejącym: I1, I2 i I3 oraz sektora porównawczego IV

Zastosowanie nawierzchni z kompozytem tłuczniowym zmniejsza wartość wskaźnika syntetycznego stanu toru J w stosunku do nawierzchni konwencjonalnej o 20%. Stabilizacja chemiczna wierzchniej warstwy tłucznia zmniejsza wartość wskaźnika syntetycznej oceny stanu toru w stosunku do odcinków bez stabilizacji o 35%.

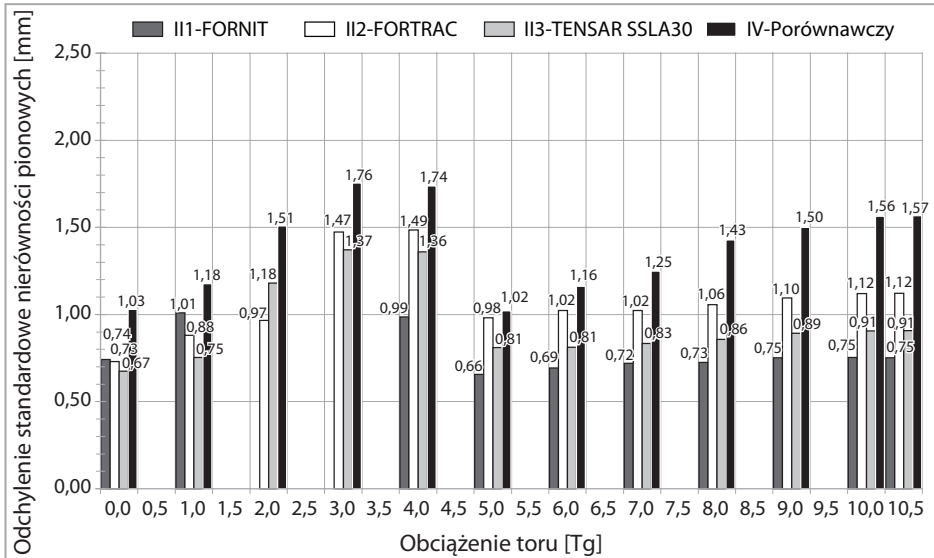


Rys. 13. Wartości wskaźników syntetycznych J dla działek II 1, II 2 i II 3 z podtorzem wzmocnionym oraz dla sektora porównawczego IV

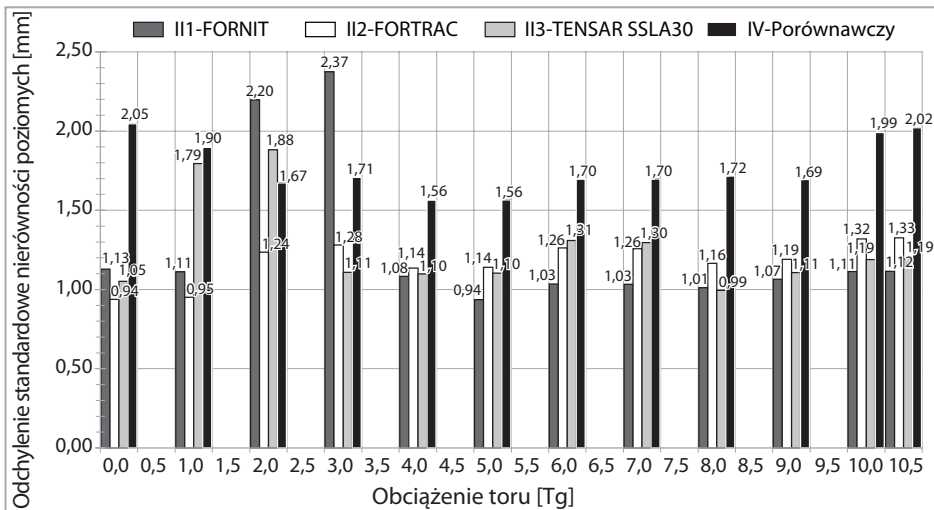
Na rysunku 14 pokazano wartości odchyłek standardowych nierówności pionowych dla działek I 1, I 2 i I 3, a na rysunku 15 dla działek II 1, II 2 i II 3 w zestawieniu z wartościami obliczonymi dla sektora porównawczego IV.



Rys. 14. Wartości odchyłek standardowych nierówności pionowych dla działek I 1, I 2 i I 3 w zestawieniu z sektorem porównawczym IV



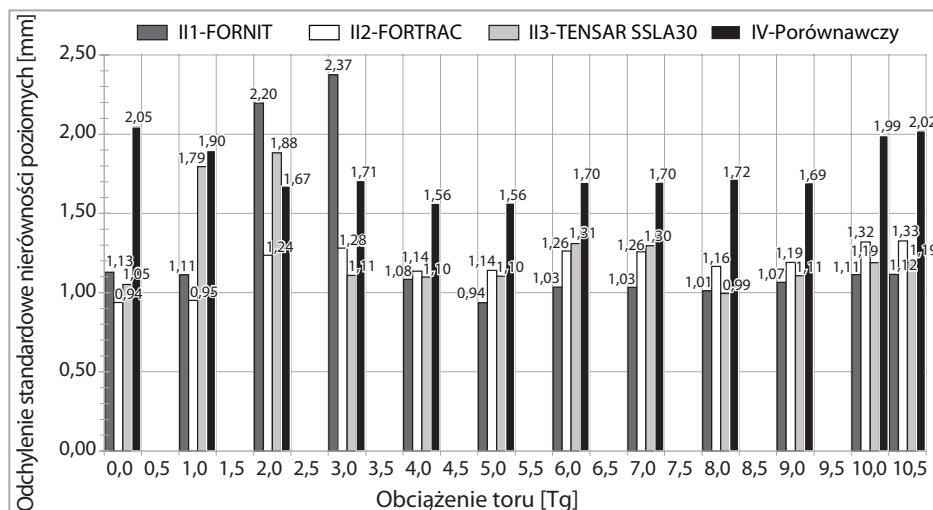
Rys. 15. Wartości odchyłeń standardowych nierówności pionowych dla działek II 1, II 2 i II 3 w zestawieniu z sektorem porównawczym I



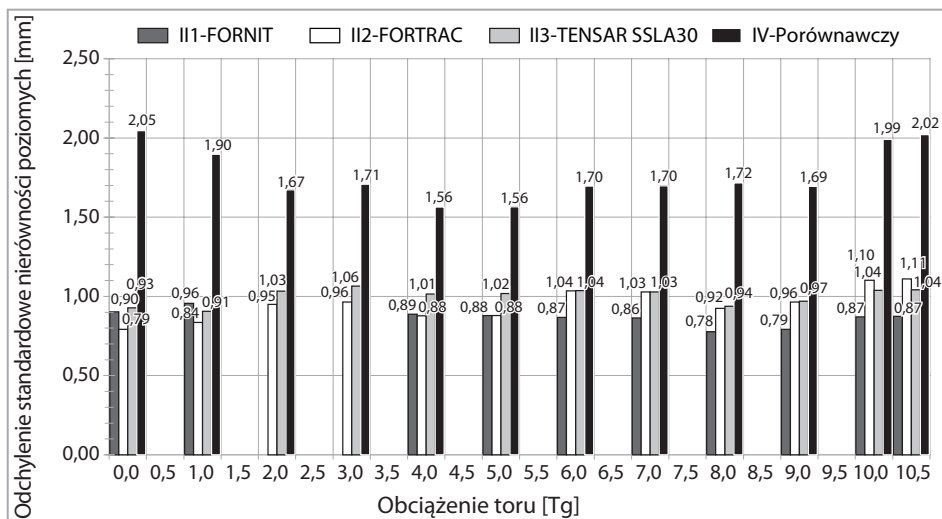
Rys. 16. Wartości odchyłeń standardowych poziomych nierówności toru dla działek I1, I2 i I3 oraz sektora porównawczego IV

Zastosowanie nawierzchni z kompozytem tłuczniovym zmniejsza średnią wartość odchyłeń standardowych nierówności pionowych w stosunku do nawierzchni konwencjonalnej o 10%. Stabilizacja chemiczna wierzchniej warstwy tłucznia zmniejsza wartość wartości odchyłeń standardowych nierówności pionowych w stosunku do odcinków bez stabilizacji o 33%. Rysunki 16 i 17 przedstawiają wartości odchyłeń

standardowych nierówności poziomych toru odpowiednio dla działek I 1, I 2, I 3 oraz II 1, II 2 i II 3 w zestawieniu z sektorem porównawczym IV.



Rys. 16. Wartości odchyłeń standardowych poziomych nierówności toru dla działek I 1, I 2 i I 3 oraz sektora porównawczego IV



Rys. 17. Wartości odchyłeń standardowych nierówności poziomych toru dla działek II 1, II 2 i II 3 oraz sektora porównawczego IV

Zastosowanie nawierzchni z kompozytem tłuczniovym zmniejsza średnią wartość odchyłeń standardowych nierówności poziomych w stosunku do nawierzchni konwencjonalnej o 30%. Stabilizacja chemiczna wierzchniej warstwy tłucznia zmniejsza wartość odchyłeń standardowych nierówności poziomych w stosunku do odcinków

bez stabilizacji o 47%. Podkreślenia wymaga fakt, iż odporność toru z podsypką stabilizowaną na odkształcenia poziome, jest znacznie większa aniżeli toru z podsypką niestabilizowaną.

Wartości wskaźników syntetycznych stanu toru J oraz odchyłeń standardowych nierówności pionowych i poziomych obliczonych dla odcinków z różnym rodzajem zbrojenia tłucznia, nie upoważniają na obecnym etapie badań do ostatecznego wyboru rodzaju zbrojenia, poza wskazówką, że wskaźniki są lepsze o 23% dla zbrojenia geosiatkami FORNIT 40×40 / FORNIT 40/40 i Tx160/SSLA30, a dla geowłókniny COMTRAC 50×50 z geosiatką FORTRAC 80×80 – o 18% w stosunku do podsypki niezbrojonej.

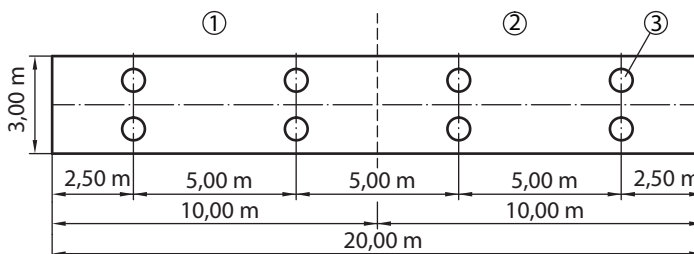
Omówione badania winny być kontynuowane w miarę narastania obciążenia, aż do momentu, kiedy zaistnieje konieczność poprawy położenia toru na odcinku badawczym, w celu utrzymania obowiązującej prędkości najszybszych pociągów kursujących na tym odcinku.

7. PROPOZYCJA ZABUDOWY NAWIERZCHNI Z KOMPOZYTEM TŁUCZNIOWYM NA NOWYM ODCINKU BADAWCZYM

Uzyskane wyniki na odcinku doświadczalnym wykazują potrzebę budowy kolejnego odcinka badawczego nawierzchni kolejowej z kompozytem tłuczniowym, wykonanego według technologii A. Nowy odcinek badawczy powinien obejmować dwa etapy prac:

- 1) budowę poletek doświadczalnych z nawierzchni z kompozytem tłuczniowym poza torami głównymi zasadniczymi istniejącej linii,
- 2) budowę odcinka doświadczalnego nawierzchni z kompozytem tłuczniowym w torze zasadniczym istniejącej linii.

Poletka doświadczalna (rys. 18) posłużyłyby do wyboru najwłaściwszego sposobu wykonania nawierzchni z kompozytem tłuczniowym w różnych konfiguracjach rozmieszczenia zbrojenia i przy różnych sposobach zagęszczania tłucznia (wariant 1, wariant 2). Badanie obejmowałoby: dobór parametrów siatki, głębokość i miejsce ułożenia siatki,



Rys. 18. Schemat poletka doświadczalnego: 1) działka do zabudowy jednego rodzaju konfiguracji kompozytu tłuczniowego i sposobu zagęszczania, 2) działka do zabudowy drugiego rodzaju kompozytu tłuczniowego i sposobu zagęszczania, 3) miejsce pomiaru modułu odkształcenia podłoża

dobór sposobów zagęszczania podsypki i wpływ tych czynników na uzyskiwane zagęszczenie kompozytu tłuczniowego (wartość modułu odkształcenia podłoża).

Na podstawie badań na poletkach doświadczalnych byłyby opracowane wymagania techniczne dotyczące technologii budowy nawierzchni z wybraną konfiguracją kompozytu tłuczniowego i sposobu jego zagęszczania (ewentualnie dwóch wariantów) na wytypowanym odcinku doświadczalnym istniejącej linii.

Budowa odcinków doświadczalnych (rys. 19) przez wykonawcę wskazanego przez PKP PLK S.A. na określonej, modernizowanej linii kolejowej obejmowałaby:

- nawierzchnię z wybranym rodzajem kompozytu tłuczniowego (zbrojonego geosiatkami na dobranej głębokości w dolnej i górnej warstwie tłucznia z zewnętrzną warstwą tłucznia stabilizowaną chemicznie),
- nawierzchnię klasyczną na podsypce tłuczniowej, na całej długości odcinka nawierzchnia z szynami 60E1 na podkładach PS 94 i przytwierdzeniem sprężystym SB.

Nawierzchnia:		Szyna 60 E1 Podkład PS 94, przytwierdzenie SB
500 m		500 m
250 m	250 m	
Wariant I nawierzchni z kompozytem tłuczniowym	Wariant II nawierzchni z kompozytem tłuczniowym	ODCINEK PORÓWNAWCZY PODSYPKA TŁUCZNIOWA
Podtorze wzmocnione warstwą niesortu		Podtorze wzmocnione warstwą niesortu
Działka 1	Działka 2	
SEKTOR I		SEKTOR II

Rys. 19. Schemat odcinka doświadczalnego

8. PODSUMOWANIE

Istnieje możliwość zwiększenia odporności nawierzchni kolejowej z podsypką na powstawanie nierównomiernych, trwałych odkształceń toru przez zastosowanie zaproponowanego kompozytu tłuczniowego. Przeprowadzone badania wykazały, że nawierzchnię z kompozytem tłuczniowym charakteryzują mniejsze syntetyczne wskaźniki stanu toru w porównaniu z torem konwencjonalnym. Wniosek ten potwierdzają również wyniki oceny odkształceń pionowych i poziomych. Stabilizacja chemiczna wierzchniej warstwy tłucznia zwiększa odporność nawierzchni na odkształcenia poziome i pionowe toru.

W toku badań stwierdzono niewielkie różnice w ocenie odcinków z podsypką zbrojoną różnymi rodzajami geosiatek. Na obecnym etapie badań wybór rodzaju zbrojenia (rodzaju geosiatek) okazał się niemożliwy.

Wskazane jest kontynuowanie badań stanu toru na istniejącym odcinku w miarę narastania obciążenia toru ruchem aż do momentu, kiedy zaistnieje konieczność po-

prawienia położenia toru w celu utrzymania prędkości obowiązującej na CMK. W przyszłości należałoby zabudować na kolejnym odcinku doświadczalnym nawierzchnię z kompozytem tłuczniowym przy zastosowaniu technologii polegającej na zagęszczaniu warstw tłucznia zbrojonego geosiatkami za pomocą walców samobieżnych.

BIBLIOGRAFIA

1. Basiewicz T.: *Nawierzchnia kolejowa na podłożu betonowym CBP-74*. Konferencja Naukowa Instytutu Budownictwa Lądowego. Politechnika Gdańska, maj, 1975.
2. Basiewicz T., Gołaszewski A., Towpik K., Kukulski J.: *Nawierzchnia kolejowa dla linii dużych prędkości w warunkach polskich*. Zadanie badawcze 2.7. Opracowanie technologii nawierzchni PW-BGT. Politechnika Krakowska, 2008.
3. *Beanspruchung des Gleises, der Bettung und des Unterbaus durch Verkehrslasten. Beanspruchung der Bettung und des Unterbaus*. ORE Komitet D 71. Utrecht, 1969–1972.
4. *Ceresit*. Materiały ofertowe Henkel Bautechnik, 2006.
5. Czyczuła W.: *Eksploatacyjna stabilność drogi kolejowej*. Tom 126 z Monografią. Kraków, Wydawnictwa Politechniki Krakowskiej, 1992.
6. Esveld C.: *Law maintenance ballastless track structures*. „Rail Engineering” [International Edition], 1997, nr 3.
7. Fendrich L.: *Feste Fahrbahn – Stadtbahn Berlin*. ETR, Hestra Verlag, 1997.
8. *Geosiatka Tensar*. Materiały ofertowe, 2002.
9. Gisterek I.: *Badania i analiza efektów stabilizacji podsypki*. Rozprawa doktorska. Politechnika Wroclawska, 2011.
10. Gisterek I., Krużyński M.: *Nawierzchnia kolejowa ze wzmocnioną podsypką*. Materiały Konferencji „Nowoczesne metody stabilizacji podłoża pod nawierzchnie drogowe i kolejowe”, Żmigród, 2009.
11. Leykauf G., Lechner B., Stahl W.: *Improved ballasted track for high-speed lines*. Materiały Konferencji „Rail Engineering”, London, 2004.
12. *MC-Ballastbond 70*. Żywica poliuretanowa do wiązania kruszywa oraz podsypki kolejowej. Materiały ofertowe.
13. PN-SS-02205:1998 *Drogi samochodowe – Roboty ziemne – Wymagania i badania nawierzchni podatnych i podłoża przez obciążenia płytą*.
14. Tymczasowe warunki techniczne wykonania i odbioru podsypki tłuczniowej naturalnej i z recyklingu stosowanej w nawierzchni kolejowej (ILK-3b-5100/10/07). Biuro Dróg Kolejowych. PKP Polskie Linie Kolejowe S.A., 2007.
15. *Ujednolicone kryteria jakości podsypki oraz metody oceny jej stanu w torze*. ERRI, Komitet D 182. Utrecht, 1989–1994.
16. Warunki techniczne utrzymania nawierzchni na liniach kolejowych PKP Id-1 (D-1). Polskie Linie Kolejowe S.A. Warszawa, 2005.
17. Warunki techniczne utrzymania podtorza kolejowego Id-3 (D-4). Załącznik do Zarządzenia nr 9 Zarządu PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. z dnia 4 maja, 2009 r.