

WPLYW UGIĘCIA PRZESEŁ MOSTU KOLEJOWEGO Z KORYTEM BALASTOWYM NA NAPRĘŻENIA W SZYNACH

Wojciech Wieczorek

mgr inż., Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Lądowej, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, tel.:
+48 664 678 971

Streszczenie. *W artykule omówiony został realistyczny wpływ ugięcia przeseł mostu kolejowego na powstałe naprężenia w szynach. W celu zweryfikowania rzeczywistych naprężeń poczyniono następujące założenia: rozdzielono opór wzdłużny toru na osobne opory podsypki oraz przytwierdzeń. Założenia te zostały zaimplementowane do numerycznego modelu złożonego z elementów bryłowych oraz interfejsowych (które pośredniczą pomiędzy elementami skończonymi). Przeanalizowano przypadki obliczeniowe dla okresu letniego oraz zimowego. Otrzymane wyniki porównano z wynikami uzyskanymi przy przyjęciu założeń Eurokodu.*

Słowa kluczowe: *naprężenia w szynach, opór wzdłużny, nawierzchnia podsypkowa, ugięcie przeseł*

1. Wstęp

W związku z modernizacją polskiej sieci kolejowej dokonuje się także modernizacji obiektów mostowych poprzez wymianę przeseł lub – najczęściej – budowę nowych obiektów mostowych, zwłaszcza wtedy, gdy wraz z modernizacją linii kolejowej zwiększa się prędkość eksploatacyjna lub / i naciski osi taboru. Zgodnie z obowiązującymi przepisami Id-2 [1] na nowych i modernizowanych obiektach inżynierskich należy stosować tor na podkładach i podsypce tłuczniowej. W powyższych przypadkach należy stosować obiekty mostowe z korytem balastowym. Jedynie obiekty istniejące mogą w dalszym ciągu posiadać inny typ nawierzchni, np. mostownice. Wyjątkowo, na drodze odstępstwa od przepisów mogą być stosowane nawierzchnie bezpodsypkowe.

Celem niniejszego artykułu jest analiza długiego obiektu mostowego o rozpiętości dylatacyjnej 74 m z nawierzchnią podsypkową w korycie balastowym w kontekście dodatkowych naprężeń występujących w szynach toru bezстыkowego, które powstają w wyniku pracy (ugięcia) przeseła. Czynnikiem determinującym w/w naprężenia jest wartość oporu wzdłużnego toru. Przykładowo, w pracy [4] był on nieliniowy. W dalszej części pracy analizowany będzie opór sprężysto – plastyczny, zgodnie z [2].

Według obowiązującego Eurokodu (EN 1991-2) [2], w celu obliczenia dodatkowych naprężeń w szynach pochodzących od pracy przęsła obiektu, należy stosować następujący wzór [7]:

$$\Sigma R = \alpha R_1 + \beta R_2 + \gamma R_3 \quad (1)$$

Gdzie dla obliczenia naprężeń i przemieszczeń w szynach na przęsle swobodnie podpartym lub ciągłym; współczynniki kombinacyjne:

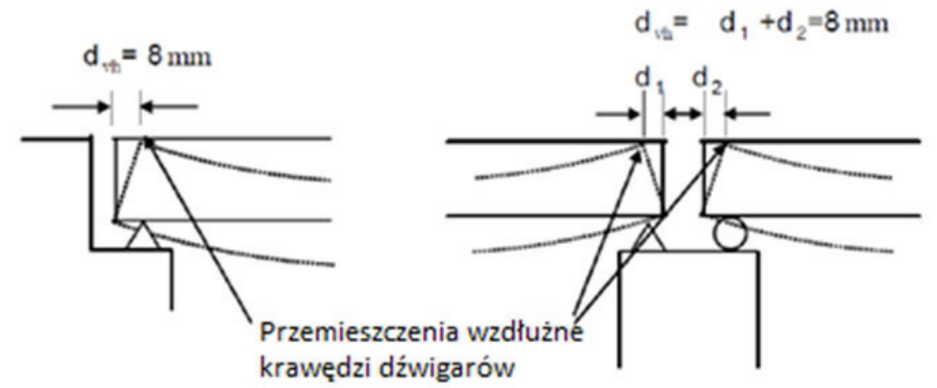
$$\alpha, \beta, \gamma = 1,$$

oraz:

R1 - oddziaływanie powstające w wyniku wydłużenia/skrócenia przęsła pod wpływem zmian temperatury,

R2 - oddziaływanie powstające w wyniku hamowania pociągu na obiekcie,

R3 - oddziaływanie od ugięcia pionowego przęsła, co skutkuje obrotami przęsła nad podporami oraz zmianą długości szyny na przęsle, gdyż musi ona być mierzona „po łuku”, odpowiadającym ugięciu przęsła (rys. 1).

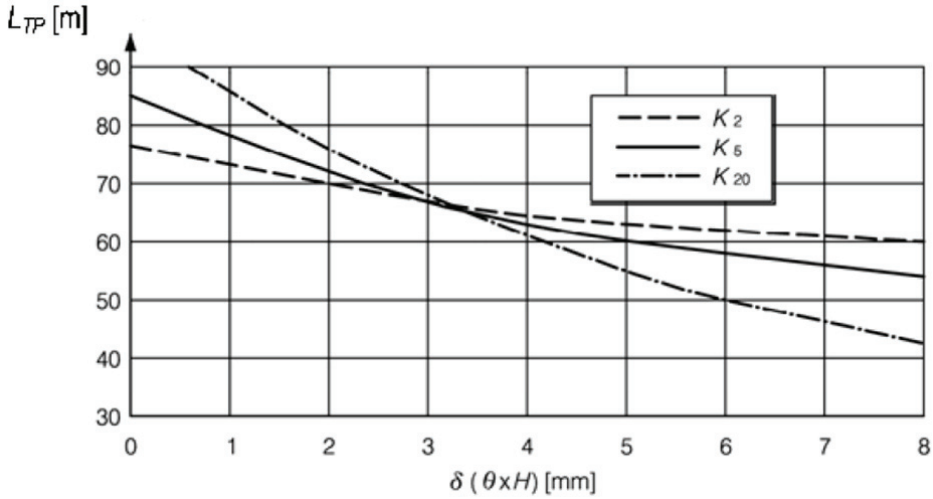


Rys. 1. Przemieszczenia górnej krawędzi dźwigarów w wyniku obrotów nad podporami – wartość dopuszczalna tych przemieszczeń wynosi 8 mm [2]

Warto wspomnieć, iż dopuszczalne naprężenia w szynach wynoszą [5]:

- dla naprężeń ściskających: Tor na podsypce – 72 [MPa];
- dla naprężeń rozciągających: Mocowanie bezpośrednie – 92 [MPa];
- dla toru na podsypce i przy mocowaniu bezpośrednim – 92 [MPa].

Zgodnie z Eurokodem [2] został wyznaczony obszar, przy którym nie nastąpi przekroczenie maksymalnych naprężeń w szynach (rys. 2).



Rys. 2. Wyznaczenie obszaru, przy którym nie nastąpi przekroczenie maksymalnych naprężeń w szynach {5}

Oznaczenia:

- L_{TP} [m] w przęsłach swobodnie podpartych przy współczynniku rozszerzalności liniowej $\alpha_T = 10E-6$ [1/kelwin], $\Delta T = 35$ [kelwinów], $k_{20}/k_{60} = 20/60$ [kN/m], gdzie k -podłużna plastyczna wytrzymałość na ścinanie toru [kN/m bieżący toru]: w przypadku torów nieobciążonych ($k_{20} = 20$ kN/m i $k_{40} = 40$ kN/m), w przypadku torów obciążonych ($k_{60} = 60$ kN na metr toru);
- K [kN/m] - sztywność podtorza na tor na metr pomostu (tzn. sztywność podtorza podzielona przez liczbę torów i przez długość pomostu): $K_2 = 2 \cdot 10^3$ kN/m, $K_5 = 5 \cdot 10^3$ kN/m, $K_{20} = 2 \cdot 10^4$ kN/m;
- δ [mm] – przemieszczenie poziome górnej krawędzi pomostu wywołane obrotem końca pomostu.

Należy tutaj zaznaczyć, iż w niniejszym artykule wykonano obliczenia z uwzględnieniem innego podejścia, tzn. składania oporów wzdłużnych, co może wprowadzić korektę do wyznaczonych obszarów.

W niniejszym artykule Autor rozważa jedynie jeden element wspomnianego oddziaływania - por. wzór (1) - tzn. jedynie obroty przęseł nad podporami R_3 (rys. 1). Dodatkowym założeniem niniejszej pracy jest brak przyrządów wyrównawczych na analizowanym obiekcie (fot. 1 oraz 2). Przyrządy te tymczasowo usunięto. Innymi słowy rozważany jest przypadek dający największe przyrosty siły wzdłużnej w szynach (oraz odpowiadające im naprężenia), tzn. przypadek toru bezстыkowego, który bez wątpienia jest konstrukcją najbardziej pożądaną z punktu widzenia utrzymania toru, wymaga on najmniejszego nakładu pracy podczas utrzymania oraz jest najmniej awaryjny.



Fot. 1. Usunięte przyrządy wyrównawcze na analizowanym obiekcie

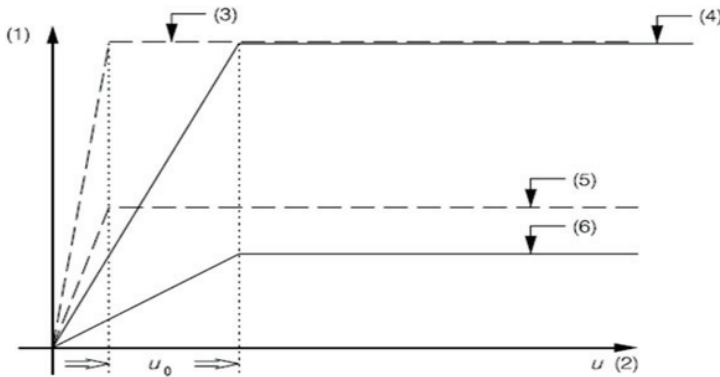


Fot. 2. Analizowany obiekt na rzece Wisłocze (trzecie przęsło znajduje się nad rzeką), na linii E30, km 108,400 (w pobliżu Dębicy)

2. Parametry oporu wzdłużnego toru – podejście wg Eurokodu

Podejście normowe Eurokodu (PN-EN 1991-2:2003) zakłada dwa przypadki obliczeniowe, zależne od pory roku: dla lata oraz zimy. Przypadek pierwszy mówiący o zachowaniu się układu tor-podsypka zakłada, że opór wzdłużny przytwierdzenia szyny do podkładu jest nieskończenie duży (połączenie sztywne) oraz, że maksymalne przemieszczenie układu w podsypce wynosi $u_0 = 2$ mm. W przypadku zimowym zakładamy natomiast, że podsypka jest na sztywno połączona z podkładem (nieskończony opór), a przytwierdzenie posiada graniczne przemieszczenie $u_0 = 0.5$ mm. Dla obydwu przypadków (lato/zima) rozróżniamy też opór wzdłużny toru obciążonego oraz nieobciążonego.

EN 1991-2:2003 (E)



Rys. 3. Charakterystyka oporu wzdłużnego toru {2}

Oznaczenia:

- (1)- opór wzdłużny na 1 [mb],
- (2)- przemieszczenie względne szyny w stosunku do powierzchni pomostu,
- (3)- opór wzdłużny toru obciążonego w zimie,
- (4)- opór wzdłużny toru obciążonego w lecie,
- (5)- opór toru nieobciążonego w zimie,
- (6)- opór toru nieobciążonego w lecie,
- u_0 - przemieszczenie graniczne dla oporu liniowego

Podejście do obliczeń wg Eurokodu z pewnością daje wyniki obliczeń po „bezpiecznej” stronie, jednak zdaniem Autora może powodować przewymiarowanie konstrukcji i dawać przeszacowane wartości naprężeń w szynach. W związku z tym, może być powodem niepotrzebnie instalowanych urządzeń wyrównawczych. Tabela 1 przedstawia zestawienie obliczeniowych oporów wzdłużnych toru na obiekcie mostowym.

Tabela 1. Opór wzdłużny toru (na 1 mb) do wyznaczania granicznych oddziaływań konstrukcji na tor wg [2]

Nawierzchnia	Przypadek obciążenia	Przemieszczenie graniczne u_0 [mm]	Graniczny (plastyczny) opór wzdłużny toru r [kN/mb]	Obliczona sztywność oporu wzdłużnego [kN/mm/mb]
Podsypkowa w lecie	Tor nieobciążony	2.0 (podkład w podsypce)	20 (r_{pd})	10.0 (k_{pd})
	Tor obciążony	2.0 (podkład w podsypce)	60 (r_{pd})	30.0 (k_{pd})
Podsypkowa w zimie	Tor nieobciążony	0.5 (przytwierdzenie)	40 (r_p)	80.0 (k_p)
	Tor obciążony	0.5 (przytwierdzenie)	60 (r_p)	120.0 (k_p)

3. Rzeczywista praca podsypki oraz przytwierdzeń - identyfikacja parametrów modelu obliczeniowego

Rzeczywista praca toru bezстыkowego jednak jest nieco inna niż zakładana w obliczeniach przez wspomnianą normę. Pierwszym zagadnieniem jest przytwierdzenie szyny do podkładu, które nigdy nie jest do końca sztywne, niezależnie od pory roku. Badania przytwierdzeń SB z przekładką PKW60 wskazują, że przemieszczenie graniczne wynosi co najmniej 1.5 mm [3], co znacznie wpływa na wartość oporu wzdłużnego szyny. Zmiana sztywności wzdłużnej w ciągu całego roku nie powinna przekroczyć 20%, co korzystnie wpływa na pracę toru w zimie, kiedy podsypka może zostać uznana za sztywną. Ponadto, jak pokazują badania [3], charakterystyka oporu wzdłużnego podsypki jest nieliniowa a nie sprężysto-plastyczna (rys. 3), co wpływa na redukcję oporu wzdłużnego. Co prawda, podsypka jest zwykle sztywniejsza w zimie, ale ten przyrost sztywności jest znaczący tylko w przypadku podsypki źle utrzymanej, zanieczyszczonej. W przypadku dobrego utrzymania wzrost sztywności nie jest tak duży [3].

Należy jednak zaznaczyć, że przekładki podszynowe PKW60 [6] nieco usztywniają się w kierunku pionowym w trakcie eksploatacji do ok. 30% - 60% (a nawet więcej), co może mieć niekorzystny wpływ na naprężenia w szynach na moście. Nie wiadomo jednak do końca w jakim stopniu usztywniają się w kierunku wzdłużnym, dlatego obliczenia będą rozważać tylko przypadek toru nieobciążonego.

Do wyznaczenia realnych oporów wzdłużnych wykorzystano wzór bazujący na szeregowym zestawieniu poszczególnych oporów wzdłużnych z zachowaniem modelu sprężysto-plastycznego, co skutkuje otrzymaniem wartości oporu całego toru w postaci:

$$\begin{cases} \frac{1}{k_z} = \frac{1}{k_p} + \frac{1}{k_{pd}} \\ r_z = \min \{ r_p, r_{pd} \} \end{cases} \quad (2)$$

gdzie:

k_z - sztywność zastępcza oporu wzdłużnego toru,

k_p - sztywność oporu wzdłużnego przytwierdzeń,

k_{pd} - sztywność oporu wzdłużnego podkładów w podsypce,

- r_p - wartość maksymalna (graniczna) oporu przytwierdzeń,
 r_{pd} - wartość maksymalna (graniczna) oporu podkładów w podsypce,
 r_z - opór zastępczy.

Wyznaczono też wypadkowe wartości pojedynczych oporów wzdłużnych na podstawie wartości zalecanych we wspomnianym EC, tzn. wartości obliczeniowe są następujące:

- a) przypadek letni

$$k_p = \infty \text{ oraz } k_z = k_{pd} = 10 \text{ [kN/mm/mb];}$$

- b) przypadek zimowy

$$k_{pd} = \infty \text{ oraz } k_z = k_p = 80 \text{ [kN/mm/mb].}$$

Przy wyznaczaniu oporu wzdłużnego toru w przypadku tzw. realnym zastosowano opór wzdłużny przytwierdzenia zgodnie z [3], tzn. przyjęto wartość, iż dla siły 9 kN następuje przesunięcie równe 1.5 mm na podkład. Założono, że sztywność przytwierdzenia w ziemie zwiększa się o 50% (zgodnie z literaturą maksymalnie o 20%), co jest założeniem bezpiecznym. W obu przypadkach założono, że opór przytwierdzenia jest liniowy, tzn. nie ma wyraźnie określonej granicy plastyczności. Przy rozmieszczeniu podkładów wynoszącym 60 cm, otrzymujemy:

- a) przypadek letni

$$k_p = 6 \text{ [kN/mm/podkład]}, \text{ a stąd } k_p = 10 \text{ [kN/mm/mb];}$$

- b) przypadek zimowy

$$k_p = 6 * 1.5 = 9 \text{ [kN/mm/podkład]}, \text{ a stąd } k_p = 15 \text{ [kN/mm/mb];}$$

Powyższe wartości wykorzystano do wyliczenia oporów realnych wg wzoru (2):

- a) przypadek letni

$$k_z = 5 \text{ [kN/mm/mb]} \text{ oraz } r_z = 20 \text{ [kN/mb];}$$

- b) przypadek zimowy

$$k_z = 12.63 \text{ [kN/mm/mb]} \text{ oraz } r_z = 40 \text{ [kN/mb];}$$

W tabeli 2 zestawiono zbiorcze wyniki wartości oporów wzdłużnych. Założono dodatkowo dla celów porównawczych występowanie bardzo dużego oporu wzdłużnego, co zostało nazwane oporem przeszywnionym. Jest to trzeci przypadek obliczeniowy.

Tabela 2. Wartości oporów wzdłużnych wyznaczone przez Autora

	Przypadek 1			Przypadek 2			Przypadek 3		
	Opór realny			Opór wg EC			Opór przeszywniony		
	r_z	k_z	$k_z / \text{podkład}$	r_z	k_z	$k_z / \text{podkład}$	r_z	k_z	$k_z / \text{podkład}$
Jednostka	[kN/mb]	[kN/mm/mb]	[kN/mm/podkład]	[kN/mb]	[kN/mm/mb]	[kN/mm/podkład]	[kN/mb]	[kN/mm/mb]	[kN/mm/podkład]
Lato	20.0	5.0	3.0	20.0	10.0	6.0	∞	∞	∞
Zima	40.0	12.6	7.6	40.0	80.0	48.0	∞	∞	∞

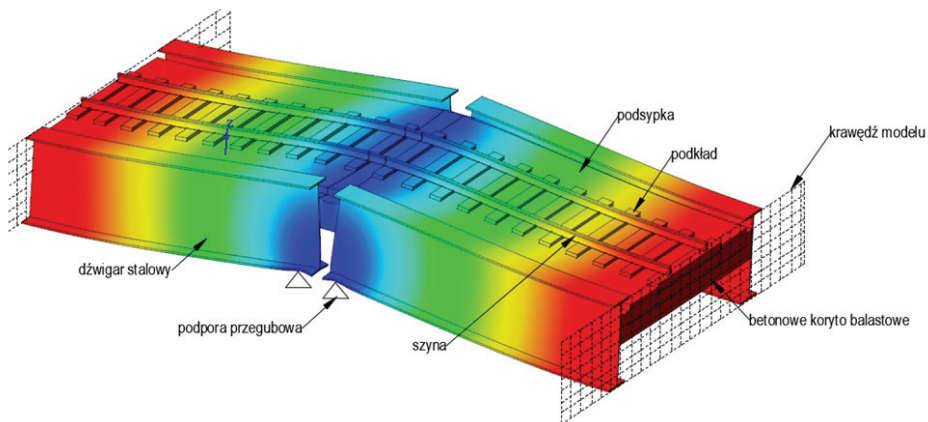
Wprowadzenie dodatkowego oporu przytwierdzenia (Przypadek 1) skutkuje zmniejszeniem obliczeniowej sztywności oporu wzdłużnego toru na obiekcie mostowym w stosunku do tych zalecanych w Eurokodzie w następujących proporcjach:

- dla toru nieobciążonego w lecie: 0.50 (50% wartości zalecanej przez Eurokod),
- dla toru nieobciążonego w zimie: 0.16 (16% wartości zalecanej przez Eurokod).

4. Model numeryczny

W celu odtworzenia warunków rzeczywistych zbudowano model numeryczny mający odwzorować zachowanie się szyny w warunkach ugięcia przęsła na obiekcie mostowym. Jako badany obiekt wybrano most nad rzeką Wisłoką, na linii E30, km 108,400 (fot. 2). Obliczenia przeprowadzono w środowisku Midas FEA.

Model zbudowano z elementów bryłowych (czworościennych oraz sześciościennych) oraz interfejsowych. Odzwierciedla on dwa fragmenty przęseł o długości 7 m każdy, znajdujących się nad podporą. Całkowita liczba węzłów modelu to 151 793, natomiast liczba stopni swobody to 454 407.



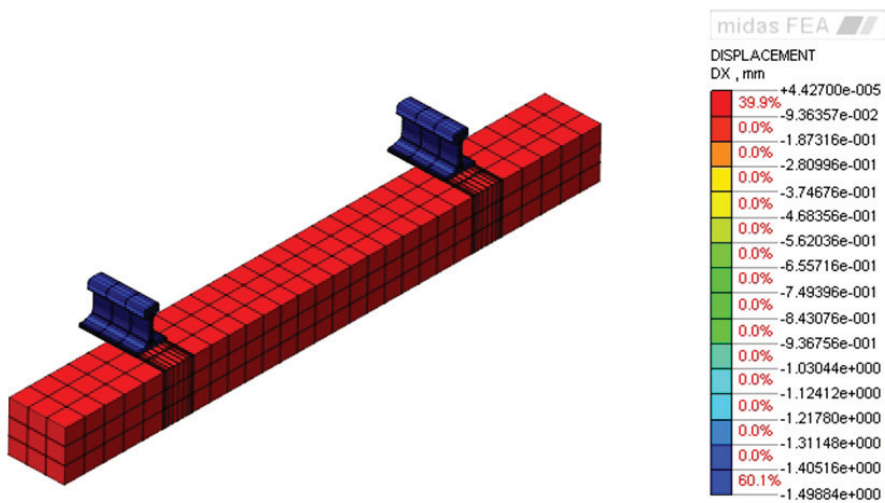
Rys. 4. Przesunięcia wywołane ugięciem przęsła w wykorzystanym modelu numerycznym

Pomiędzy szyną a podsypką założono dwuwymiarowe elementy interfejsowe mające odzwierciedlać rzeczywistą interakcję szyny z podkładem (symulacja przytwierdzeń sprężystych SB-4). Parametry interfejsu dobrano w taki sposób, aby były one zgodne z badaniami laboratoryjnymi (opisane w poprzednim rozdziale). Podsypkę zamodelowano jako bryłę o różnych parametrach zależnie od jej umiejscowienia oraz rozważanego przypadku. Uwzględniono sztywność podsypki:

- tuż pod podkładami założono moduł Younga jak dla podsypki ściskanej, tj. 120 MPa.
- wokół podkładów założono moduł Younga jak dla podsypki ścinanej, tj. ok. 1.4 MPa (na podstawie eksperymentu numerycznego opisanego poniżej).

Identyfikację parametrów przeprowadzono na podstawie eksperymentu numerycznego, polegającego na obciążeniu podkładu zanurzonego w podsypce (jako kontinuum charakteryzującym się pewnym modułem Younga i współczynnikiem Poissona) w kierunku pionowym (dla identyfikacji podsypki na ściskanie) oraz w kierunku wzdłużnym (dla identyfikacji parametrów podsypki na ścinanie). Podczas obciążania podkładu badano jego przemieszczenia. W każdym przypadku dostosowywano moduł Younga podsypki. Eksperyment numeryczny zakończono wtedy gdy uzyskano wymagane (tzn. zgodnie z badaniami doświadczalnymi) przemieszczenia podkładu przy wartości siły odpowiadającej także wartościom znanym z pomiarów [3]. Po uzyskaniu dobrej zgodności oporów numerycznych z oporami z badań, odczytano wartość modułu Younga dla analizowanej podsypki – był to właśnie identyfikowany parametr modelu.

Poniżej (rys. 5) zaprezentowano przykładową identyfikację parametru interfejsu dla przypadku letniego, tj. takiego, gdy przy przyłożonej prostopadle do przekroju szyny siły o wartości 9 kN przemieszczenie wzdłużne szyny wynosiło 1.5 mm. Wartości podano na rysunku w tabeli w notacji naukowej.



Rys. 5. Identyfikacja parametrów interfejsu dla przypadku realnego letniego (widoczne przemieszczenie wzdłużne szyny równe 1.5 mm przy obciążeniu prostopadłym do przekroju 9 kN/szyna)

Następnie, warunki brzegowe założono jako blokadę przesuwu oraz obrotu belek stalowych na ich krańcach, ó oraz punktowe blokady przesuwu reprezentujące łożyska nad podporami. Układ ten pozwolił na odzwierciedlenie obrotu belek stalowych względem krawędzi łożyska. Jako obciążenie założono wymuszenie przemieszczenia skrajnych krawędzi belek w dół o 8.5 mm z obu stron, co odzwierciedla ugięcie przęsła w tym punkcie. Maksymalna wartość ugięcia wyniosła podczas badań obiektu 30 mm, w połowie jego przęsła, tj. odległości równej 37 m od podpory. Brak przytwierdzenia oraz wymuszenia na pozostałych elementach konstrukcji, tj. szynach, podsypce oraz korycie balastowym zapewniło naturalne zachowanie się szyny.

Otrzymywane wyniki naprężeń w szynach w [MPa] wyrażono w postaci ekwiwalentu termicznego [K], wyznaczonego za pomocą wzoru:

$$\Delta T = \frac{\sigma}{E * \alpha} \quad (3)$$

gdzie:

ΔT – ekwiwalent termiczny [K];

σ – naprężenie w szynie [MPa];

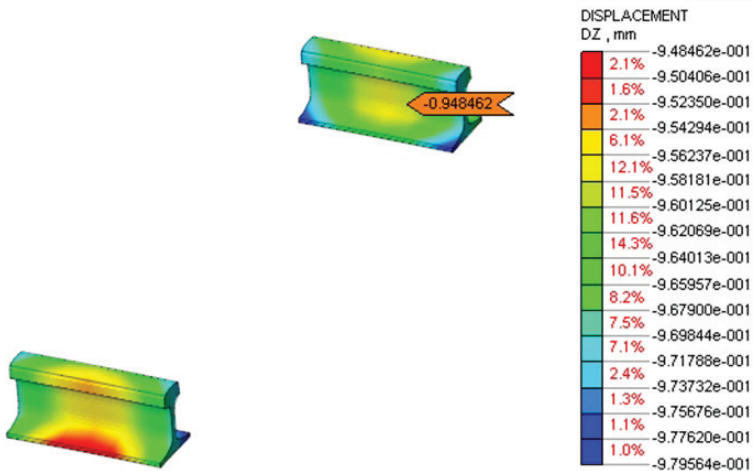
E – moduł Younga stali [210 000 MPa];

α – liniowy współczynnik rozszerzalności termicznej dla stali [$1.15 * 10^{-5}$ 1/K].

Przykładowe wyniki analizy numerycznej pokazano na rysunkach 6 i 7.



Rys. 6. Maksymalne naprężenia w szynach otrzymane dla przypadku realnego letniego



Rys. 7. Maksymalne przemieszczenie pionowe szyny dla przypadku realnego letniego

Maksymalne przemieszczenie wzdłużne po przytwierdzeniu wyniosło 0.23 mm, natomiast przemieszczenie pionowe w punkcie szczytowym (na środku) wyniosło 0.95 mm, co oznacza, iż nastąpiła kompresja podsypki o taką wartość. Maksymalne horyzontalne przemieszczenie podkładu w podsypce wyniosło 1.16 mm.

5. Podsumowanie wyników

Równoległe w celu porównania wyników przeprowadzono obliczenia dla modelu ze zmienionymi parametrami. W sumie rozważono następujące przypadki:

- Przypadek 1 (realny letni) – z parametrami zbliżonymi do rzeczywistych podczas okresu letniego (zadano konkretne wartości oporów dla przytwierdzeń oraz podsypki).
- Przypadek 1 (realny zimowy) - z parametrami zbliżonymi do rzeczywistych podczas okresu zimowego (zadano konkretne wartości oporów dla przytwierdzeń oraz podsypki).
- Przypadek 2 (zgodny z podejściem Eurokodu letni) - przytwierdzenie założono jako sztywne, parametry podsypki zidentyfikowano numerycznie wg wartości podanych przez Eurokod.
- Przypadek 2 (zgodny z podejściem Eurokodu zimowy) – podsypkę założono jako sztywną, parametry przytwierdzenia zidentyfikowano numerycznie wg wartości podanych przez Eurokod.
- Przypadek 3 (przesztywniony) – założono sztywne połączenie między elementami (brak elementów interfejsowych) oraz podsypkę jako materiał bardzo sztywny.

Poniżej w tabeli 3 przedstawiono zestawienie wybranych wyników dla w/w przypadków.

Tabela 3. Otrzymane podczas obliczeń wielkości

Przypadek	Maksymalne przyrosty naprężeń* [MPa]	Ekwiwalent termiczny ** [K]	Maksymalne przemieszczenie poziome szyny [mm]	Maksymalne przemieszczenie pionowe szyny [mm]	Maksymalne przemieszczenie poziome podkładu [mm]
1: Realny lato	29	12.00	0.23	0.95	1.16
1: Realny zima	35	14.49	0.28	0.98	1.14
2: EC lato	55	23.19	0.61	1.09	0.46
2: EC zima	62	25.67	0.67	1.40	1.14
3:Przesztywniony	119	49.28	1.15	1.38	0.99

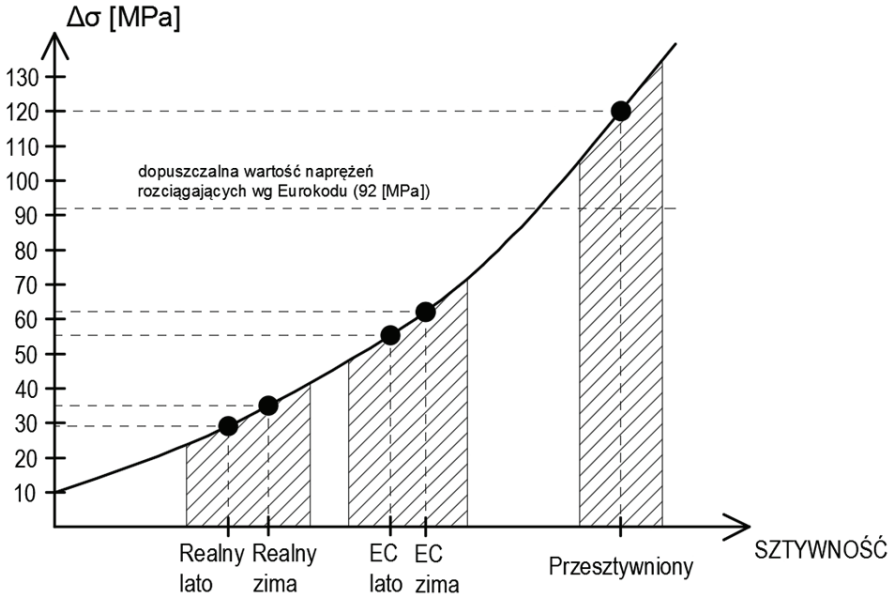
UWAGA: (*) naprężenia rozciągające, (**) obniżenie temperatury ekwiwalentnej

Analizując powyższą tabelę można zestawić ze sobą wartości naprężeń w szynach otrzymanych w zależności od przyjętych założeń:

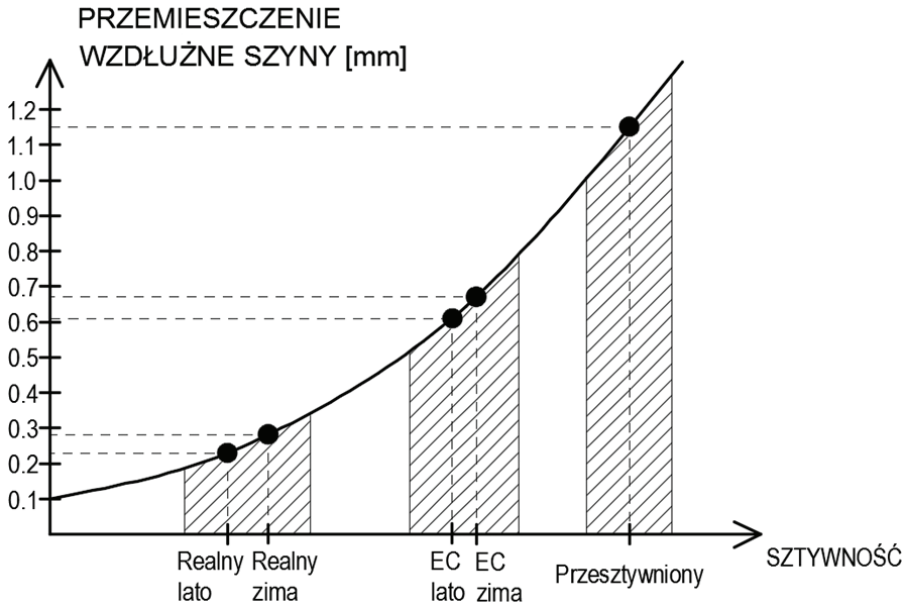
$$\frac{\text{Realny lato}}{\text{EC lato}} = 0.53$$

$$\frac{\text{Realny zima}}{\text{EC zima}} = 0.56$$

Otrzymane wyniki zilustrowano w formie wykresów syntetycznych dla: naprężeń w szynach – rys. 8 oraz wzdłużnych przemieszczeń szyn – rys. 9. Obrazują one wielkość różnicy w otrzymanych wynikach, zależnie od podejścia realnego oraz normowego.



Rys. 8. Przyrosty naprężeń rozciągających w szynach w zależności od przyjętej sztywności oporu wzdłużnego toru



Rys. 9. Przemieszczenie wzdłużne szyn w zależności od przyjętej sztywności oporu wzdłużnego toru

6. Wnioski końcowe

W pracy przedstawiono model numeryczny nawierzchni kolejowej podsypkowej na obiekcie mostowym, w którym przeanalizowano wpływ obrotów końców długich przęseł (rozpiętość 74 m, ugięcie w środku przęsła 30 mm) na dodatkowe naprężenia w szynach. Analizie poddano jedynie obszar nad podporą środkową (tzn. analizowano obroty dwóch przęseł sąsiednich). Na obiekcie znajdował się tor bezстыkowy (bez przyrządów wyrównawczych). W wyniku analizy stwierdzono:

- we wszystkich przypadkach obliczeniowych uzyskano przyrosty naprężeń w szynach, które były de facto naprężeniami rozciągającymi – odpowiadało im obniżenie temperatury ekwiwalentnej, co z praktycznego punktu widzenia oznacza powstanie pewnej dodatkowej siły rozciągającej w szynach nad podporą,
- podejście obliczeniowe wg Eurokodu powoduje około 2-krotnie przeszacowanie naprężeń w szynach kolejowych (co do modułu), w stosunku do przypadku zastosowania podejścia realnego (tzn. z zastosowaniem przytwierdzeń sprężystych); może to być jednym z powodów niepotrzebnej instalacji przyrządów wyrównawczych na obiekcie mostowym,
- zastosowana metoda szeregowego składania oporów wzdłużnych, składających się z oporu podsypki i oporu przytwierdzeń sprężystych, w bardziej realny sposób odzwierciedla pracę toru i pokazuje „łagodzący” wpływ uwzględnienia przytwierdzenia szyny do podkładów, co nie jest odzwierciedlone w Eurokocie,
- niezależnie od podejścia obliczeniowego, opór wzdłużny różni się co do wartości, w zależności od pory roku - należy uwzględnić ten fakt podczas analizy obiektu kolejowego,
- jak wspomniano, przyrosty naprężeń w szynach były „w kierunku” rozciągania, co w okresie letnim z punktu widzenia stateczności toru można uważać za korzystne, ponieważ będą one redukować ścisnienie pojawiające się w wyniku obciążenia termicznego,
- w zymie, ze względu na naprężenia rozciągające występujące w wyniku obciążenia termicznego (spadek temperatury szyn i przęseł) zaobserwujemy efekt niekorzystny, ponieważ występujące naprężenia będą się sumować.

Warto również nadmienić, że przeprowadzona analiza nie uwzględniła rzeczywistej pracy oporu podsypki, który jest nieliniowy. Jego uwzględnienie prawdopodobnie wpłynęłoby na kolejne obniżenie wartości otrzymanych naprężeń. Ponadto należałoby uwzględnić także zmienność oporu wzdłużnego podsypki w trakcie eksploatacji oraz pewną „relaksację” naprężeń, w wyniku drgań generowanych przez przejeżdżające pociągi, które wpływają na rekonfigurację ziaren tłucznia i w związku z tym zmniejszają naprężenia. Postuluje się tutaj zastosowanie modelu reologicznego podsypki.

Przeprowadzone obliczenia stanowią wstępną fazę analizy wpływu oporów wzdłużnych na obiekcie kolejowym na naprężenia w szynach. Rozważony został tylko jeden z trzech przypadków (R_3 - oddziaływanie od ugięcia pionowego prze-

sła, patrz pkt. 1). Autor widzi potrzebę dalszej analizy oddziaływań na konstrukcję oraz rozważenia przypadków zależnych od obciążeń termicznych oraz hamowania pojazdów (R_1 oraz R_2).

Bibliografia

- [1] PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. „Warunki techniczne dla kolejowych obiektów inżynierskich Id-2 (D2), Warszawa, 2005.
- [2] Polski Komitet Normalizacyjny „PN-EN 1991-2, Eurokod 1: Oddziaływanie na konstrukcje. Część 2: Obciążenia ruchome mostów”, Warszawa, 2007.
- [3] Czyczuła W., Tor bezstykowy. Politechnika Krakowska, Kraków 2002.
- [4] Czyczuła W., Sołkowski J., Towpik K., Interaction between CWR track and bridges in longitudinal direction. Archives of Civil Engineering, vol. XLIII no. 1, 1997.
- [5] Sturzbecher K., Przyrządy wyrównawcze w świetle aktualnych przepisów i norm Europejskich. Archiwum Instytutu Inżynierii Lądowej, Nr 19, 2015.
- [6] Antolik Ł., Przydatność eksploatacyjna przekładek podszytowych a wymagania norm Europejskich. Problemy Kolejnictwa – Zeszyt 152.
- [7] International Union of Railways, UIC Code 774-3 R, Track/Bridge Interaction. Recommendations for calculations. 2nd edition, October 2001.