

Dr inż. Zofia Kowalska
Instytut Kolejnictwa

BADANIA LABORATORYJNE PRZEKŁADEK PODSZYNOWYCH W PRZYTWIERDZENIACH SZYN KOLEJOWYCH WEDŁUG NORM CEN

SPIS TREŚCI

1. Wstęp
2. Amortyzacja obciążeń dynamicznych w torze
3. Projektowanie przekładek podszynowych
4. Badanie efektu obciążeń powtarzalnych
5. Określenie tłumienia obciążeń dynamicznych
6. Wnioski

STRESZCZENIE

Przedstawiono krytyczną analizę najważniejszych procedur badań laboratoryjnych przytwierdzeń szyn kolejowych, opracowanych przez 256. Komitet CEN, zawartych w normach serii PN-EN 13146 oraz PN-EN 13481. Omówiono wady i ograniczenia procedur badawczych oraz oceniono ich przydatność do obiektywnego kwalifikowania systemów prototypowych przytwierdzeń do badań eksploatacyjnych. Największą wadą podstawowego badania laboratoryjnej trwałości wyizolowanego z toru przytwierdzenia jest to, że konfiguracja cyklicznych obciążeń badawczych oraz odkształceń i wzajemnych przemieszczeń elementów przytwierdzeń są inne od występujących w torze pod działaniem ruchomego obciążenia od taboru kolejowego. Ponadto, zostały przyjęte niewłaściwe ilościowe miary trwałości przytwierdzeń.

1. WSTĘP

Przedmiotem analizy są wybrane problemy badania amortyzujących przekładek podszynowych w kontekście wymagań zawartych w normach serii PN-EN 13146 oraz PN-EN 13481, opracowanych przez CEN (Europejski Komitet Normalizacyjny; fr. *Comité Européen de Normalisation*). Omówiono najważniejsze procedury laboratoryjnych badań

przytwierdzeń szyn kolejowych oraz wady i ograniczenia tych procedur. Oceniono ich przydatność do obiektywnego kwalifikowania przytwierdzeń do badań eksploatacyjnych i następnie do eksploatacji w torze.

Normy serii PN-EN 13146 określają metody badań laboratoryjnych (Cz. 1÷7 oraz Cz. 9) i eksploatacyjnych Cz. 8 (ang. *in-service testing*). Natomiast w normach serii PN-EN 13481 podano parametry badań laboratoryjnych w zależności od konstrukcji i klasy toru oraz wymagania odnośnie do wyników badań laboratoryjnych. Trzy normy serii PN-EN 13481 zostały zharmonizowane z Dyrektywą UE dla Kolei Dużych Prędkości (KDP): Cz. 2. – dotycząca toru na podsypce z betonowymi podkładami [16], Cz. 5. – dotycząca toru bezpodsypkowego (ang. *slab track*) [17] oraz Cz. 7. – dotycząca rozjazdów i skrzyżowań [18]. Normy CEN nie określają podstawowych parametrów toru lub przytwierdzeń, takich jak sztywność statyczna czy dynamiczna. Koncepcja badań laboratoryjnych poprzedzających kosztowne badania eksploatacyjne jest trafna, jednak poważne wątpliwości budzą główne procedury badawcze zawarte w tych normach.

Podstawowym laboratoryjnym badaniem przytwierdzeń jest badanie skutków obciążeń powtarzalnych według PN-EN 13146-4 [12]. W Technicznych Specyfikacjach Interoperacyjności (TSI) [2] przyjęto nazwę: badanie laboratoryjnej trwałości 3 mln cykli. W przypadku przytwierdzeń z przekładkami amortyzującymi własności amortyzujące przekładek sprawdza się, mierząc tzw. współczynnik tłumienia obciążeń dynamicznych (ang. *impact load attenuation*) według normy PN-EN 13146-3 [11]. Niestety, dwa wymienione najważniejsze badania laboratoryjne, wykonuje się w konfiguracji obciążeń badawczych oraz przemieszczeń i odkształceń elementów przytwierdzeń istotnie innych od występujących w torze. W obu przypadkach bada się przytwierdzenia wyizolowane z toru, z zamocowanym krótkim, swobodnym odcinkiem szyny w płaskim lub jednoosiowym stanie obciążenia.

W związku z wysoką międzynarodową rangą wymienionych dokumentów normatywnych, do czasu opracowania nowych należy się do nich stosować, ale w projektowaniu przytwierdzeń, w szczególności przekładek należy też uwzględnić fakt, że ich ostatecznym przeznaczeniem jest tor kolejowy, a nie badania laboratoryjne. Dlatego w pewnych przypadkach konieczne jest wykonanie dodatkowych badań i analiz nie ujętych w normach.

2. AMORTYZACJA OBCIĄŻEŃ DYNAMICZNYCH W TORZE

Są dwa podstawowe sposoby zmniejszania obciążeń dynamicznych elementów pojazdów i nawierzchni. Pierwszy sposób polega na eliminowaniu albo zmniejszaniu źródeł uderzeń i drgań, czyli tzw. wymuszeń. Drugi sposób polega na amortyzacji w torze i w zawieszeniu pojazdu.

Amortyzacja polega na chwilowej absorpcji energii obciążenia uderzeniowego przez elementy sprężyste oraz rozproszeniu części energii uderzenia przez elementy tłumiące.

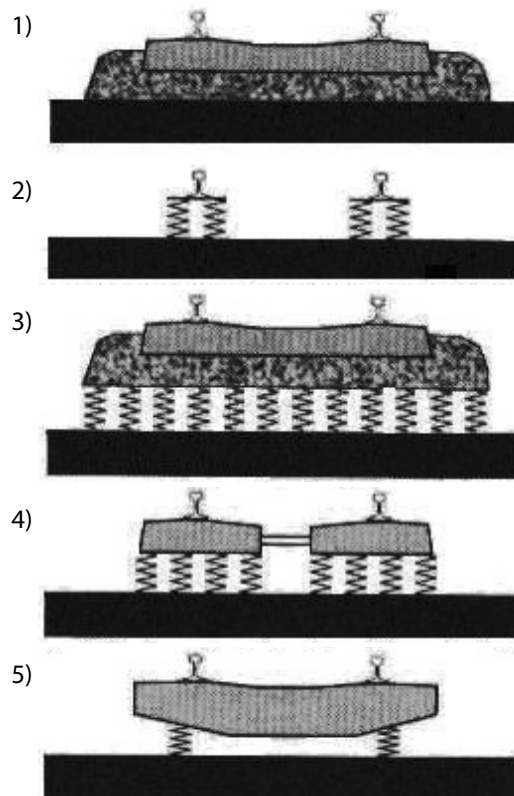
Ugięcia sprężystych przytwierdzeń wzajemnie-ruchomych ciał materialnych powodują rozłożenie w czasie i w rezultacie zmniejszenie dynamicznych sił kontaktowych. W języku polskim używa się określenia **amortyzacja** uderzeń lub drgań, chociaż w języku angielskim słowo: *amortization* jest pojęciem wyłącznie ekonomicznym i oznacza rozłożenie obciążeń finansowych w czasie. Wymuszenia w układzie pojazdu z torom można podzielić na dwie kategorie: wymuszenia immanentnie związane z ruchem pojazdu, których nie można wyeliminować oraz wymuszenia spowodowane przez różnego rodzaju defekty pojazdów i nawierzchni.

Gdy idealny pojazd szynowy jedzie po idealnym torze, tor jako złożony ustrój masowo-sprężysto-tłumiący ulega wzbudzeniu. Podobny rodzaj wzbudzenia występuje w prostym układzie ciężkiego pierścienia nawleczonego na rozciągniętą w poziomie strunę. Jeśli pierścień uzyska początkową prędkość w kierunku środka struny, to przesuwał się wzdłuż struny będzie wymuszał jej drgania pionowe. Analogicznie, wagony pociągu jadące po torze powodują pionowe ugięcie szyn i całego toru. Dynamiczna odpowiedź na takie wymuszenie zależy od konstrukcji toru oraz pojazdu. Przeciżenia dynamiczne spowodowane takim wymuszeniem zależą rosnąco od prędkości jazdy V , ale na ogół nie przekraczają kilkudziesięciu procent obciążenia statycznego.

Obciążenia dynamiczne spowodowane przez różnego rodzaju defekty toru i zestawów kołowych mogą być kilkakrotnie większe od obciążeń statycznych. Można i należy je zmniejszać, dbając o dobre utrzymanie toru oraz taboru. Najważniejsze jest unikanie bardzo dużych przeciążeń spowodowanych przez krótkie defekty powierzchni tocznych szyn i kół o długości kilku lub kilkunastu centymetrów, na przykład nierówne powierzchnie toczne spawanych lub zgrzewanych styków szynowych [8].

W praktyce należy eliminować źródła wymuszeń oraz stosować amortyzację w torze i podwoziu pojazdów, ponieważ obie metody zmniejszania uderzeń i drgań mają swoje fizyczne, techniczne i ekonomiczne ograniczenia. Zarządzający drogami kolejowymi może tylko zdecydować, na jakie działania przeznaczy więcej środków. Rysunek 1 zaczerpnięty z poradnika [6], przedstawia kilka podstawowych wariantów konstrukcji toru kolejowego, uszeregowanych według skuteczności amortyzacji obciążeń dynamicznych oraz kosztów budowy toru.

W klasyfikacji według rysunku 1 uwzględniono koszty i ogólnie rozumianą efektywność amortyzacji. W wypadku szczegółowej analizy należałoby precyzyjnie określić kryterium efektywności amortyzacji. Inne preferencje mają zarządzający infrastrukturą szynową, inne właściciele taboru kolejowego albo mieszkańcy budynków w pobliżu dróg kolejowych. Na przykład „pływający” betonowy tor jest bardzo droгим i skutecznym sposobem zmniejszania energii przekazywanej do gruntu i okolicznych budynków, ale nie zmniejsza dynamicznych sił kontaktowych w układzie koła z szyną.



Rys. 1. Podstawowe rodzaje konstrukcji toru kolejowego [6]:

- 1) tor podsypkowy, sprężynująca podsypka, 2) podatne podparcie podkładki na torze betonowym, 3) mata podpodsypkowa, 4) podkład na sprężynującej konstrukcji, 5) „pływający” betonowy mur

Ze statycznej analizy rozkładu nacisków w torze wynika, że im głębiej umieści się sprężystą warstwę amortyzującą w torze, tym skuteczniejsza będzie amortyzacja, ponieważ nacisk na jednostkę powierzchni jest mniejszy i ściskane elementy sprężynujące pracują tylko w zakresie liniowych odkształceń. To stwierdzenie jest prawdziwe, gdy siły bezwładności związane z pionowym ruchem elementów nawierzchni są pomijalnie małe.

W analizie dynamicznej, oddziaływania pociągu z taborem, podstawowym parametrem jest prędkość jazdy V . Siły dynamiczne spowodowane przez niektóre defekty zależą wprost proporcjonalnie od kwadratu prędkości. Częstotliwość podstawowej składowej drgań szyny (tablica 1) oraz impulsów wymuszenia działającego na podpory szyny zależą wprost proporcjonalnie od prędkości jazdy:

$$f_0 = V/\lambda \quad (1)$$

gdzie λ oznacza długość linii ugięcia szyny.

Tablica 1

Częstotliwości f_0 (Hz) podstawowej składowej impulsu obciążenia podpory szyny

Długość linii ugięcia λ [m]	Prędkość jazdy pociągu V [km/h]								
	40	60	80	100	120	140	160	180	200
1,2	9,3	13,9	18,5	23,1	27,8	32,4	37,0	41,7	46,3
1,8	6,2	9,3	12,3	15,4	18,5	21,6	24,7	27,8	30,9
2,4	4,6	6,9	9,3	11,6	13,9	16,2	18,5	20,8	23,1
3,0	3,7	5,6	7,4	9,3	11,1	13,0	14,8	16,7	18,5

Masa elementów nawierzchni między ruchomym źródłem wymuszenia, czyli stykiem koła z szyną, a warstwą elastyczną w torze zmniejsza skuteczność amortyzacji sił kontaktowych. Pionowe siły bezwładności rosną proporcjonalnie do przyspieszenia, czyli proporcjonalnie do kwadratu częstotliwości w wypadku ruchu harmonicznego. Wskutek bezwładności wynikowa zlinearyzowana sztywność dynamiczna toru, tj. transmitancja między siłą a ugięciem szyny – rośnie ze wzrostem prędkości i częstotliwości.

W szczególnych przypadkach przy dużych prędkościach podatne, amortyzujące przekładki podszytowe, umieszczone między szyną i masywną betonową podporą szyny, mogą być skuteczniejsze od innych głębiej położonych warstw sprężystych. Jednak bezwładność odcinka szyny o długości λ też zmniejsza efektywność amortyzacji. Im dłuższa jest linia ugięcia szyny λ , tym większa jest masa tego odcinka. Dlatego sztywność dynamiczna toru podatnego statycznie, rośnie szybciej od sztywności dynamicznej toru statycznie sztywnego. W wypadku bardzo dużych prędkości i wymuszeń przez krótkie defekty amortyzacja jest mało skuteczna. Stąd wynika konieczność częstej diagnostyki powierzchni tocznych szyn i kół oraz regularne ich szlifowanie na torach KDP. Szybkość degradacji szyn i toru zależy od ich stanu, w rezultacie jeśli nie usuwa się źródeł dynamicznych obciążeń w torze i taborze, to degradacja postępuje coraz szybciej.

Amortyzacja w torze ma też inne ograniczenia. Duże ugięcia koła pod szyną powodują wzrost oporu ruchu tocznego i ogólnie pogarszają warunki współpracy koła z szyną. Zwiększenie podatności przytwierdzenia w kierunku pionowym powoduje zwiększenie jego podatności w kierunku poprzecznym, co jest niepożądane ze względu na jakość prowadzenia pojazdu w torze oraz prędkość krytyczną wężykowania.

Amortyzacja w zawieszeniach zestawów kołowych nie stanowi skutecznej alternatywy amortyzacji w torze. Zawieszenia pojazdów szynowych mają dużą tzw. nieodsprężynowaną masę, w uproszczeniu – masę zestawu kołowego. Dzięki temu pudło wagonu jest skutecznie odizolowane dynamicznie od toru w zakresie wysokich częstotliwości. Komfort jazdy może być wysoki pomimo bardzo dużych sił kontaktowych w układzie koła z szyną spowodowanych przez krótkie nierówności podczas jazdy z dużą prędkością [8].

3. PROJEKTOWANIE PRZEKŁADEK PODSZYNOWYCH

Projektując wyrób techniczny należy uwzględnić jego funkcje, przeznaczenie, warunki użytkowania. Na tej podstawie określa się wymagania i założenia do projektu. Ponadto bardzo przydatna jest analiza istniejących rozwiązań w kraju i na świecie. W wypadku projektowania wyrobów stanowiących składnik interoperacyjności kolei należy także uwzględnić wymagania formalne zawarte w normach zharmonizowanych oraz TSI.

Normy europejskie PN-EN 13146, PN-EN 13481 oraz TSI dla kolei konwencjonalnej [2] i KDP [1, 3] stawiają bardzo duże wymagania odnośnie do laboratoryjnej trwałości przytwierdzeń. Od trwałości przekładki zależy pewność zamocowania i w rezultacie bezpieczeństwo ruchu pociągów. Natomiast wymagania dotyczące zdolności przekładki do amortyzowania obciążeń uderzeniowych są bardzo umiarkowane. W TSI [2] do Dyrektywy dla kolei konwencjonalnej [5] nie zawarto żadnych wymagań dotyczących sztywności przytwierdzeń. Natomiast zawarto wymaganie badania trwałości laboratoryjnej 3 mln cykli. Chociaż norma [12] nie jest powołana w TSI, z tekstu wynika, że badanie należy wykonywać według tej normy.

Według TSI [3] do Dyrektywy dla KDP sztywność dynamiczna przytwierdzeń przeznaczonych do toru na podsypce powinna być mniejsza od 600 kN/mm. Dla większości elastomerów, tzw. dynamiczne przeszywnienie, czyli stosunek modułu sztywności dynamicznej dla małych częstotliwości do modułu sztywności statycznej wynosi od 1 do 2. Można zatem przyjąć z pewnym zapasem, że przytwierdzenie o sztywności statycznej 300 kN/mm spełnia to wymaganie.

Można przyjąć w uproszczeniu, że statyczna, pionowa sztywność dyskretnej podpory szyny jest szeregowym połączeniem sztywności przekładki i zredukowanej sztywności podłoża sztywnego betonowego podkładu. Wypadkową statyczną sztywność podparcia szyny K w przytwierdzeniu bezpośrednim na torze podsypkowym można obliczyć według wzoru:

$$K = \frac{k_1 k_2}{k_1 + k_2}, \quad (2)$$

gdzie k_1 oznacza zredukowaną pionową sztywność podłoża podkładu, a k_2 – sztywność przekładki podszynowej.

W szeregowym połączeniu sprężyn o sztywności wynikowej połączenia decyduje przede wszystkim sprężyna o mniejszej sztywności. W nowym projekcie normy [11] dopuszcza się dwa rozwiązania: umieszczenie podpory szyny z badanym przytwierdzeniem na grubej warstwie podsypki – tak jak w normie obecnie obowiązującej, albo na gumie zastępującej podsypkę, przy czym sztywność tej gumy zredukowana do części podszynowej podpory powinna być równa od 40 do 100 kN/mm. W tablicy 2 zestawiono obliczone według wzoru (2) wartości sztywności K podparcia szyny w przytwierdzeniu w zależności od wartości k_1 w zakresie od 40 do 100 kN/mm.

Tablica 2

Wynikowa sztywność statyczna K podparcia szyny w przytwierdzeniu bezpośrednim

Sztywność podłoża podpory szyny k_1 [kN/mm]	Sztywność przekładki podszykowej k_2 [kN/mm]			
	100	80	60	40
100	50,0	44,4	37,5	28,6
80	44,4	40,0	34,3	26,7
60	37,5	34,3	30,0	24,0
40	28,6	26,7	24,0	20,0

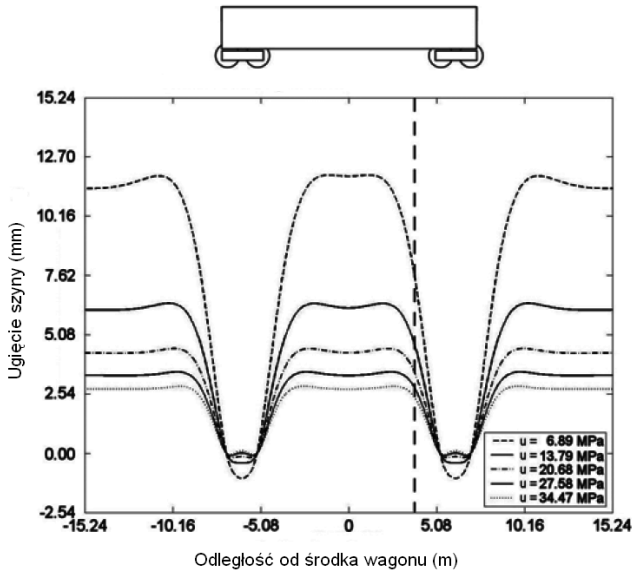
W wypadku sztywnej podsypki, gdy $k_1=100$ kN/mm, znaczne zmniejszenie sztywności przekładki k_2 od 100 do 40 kN/mm powoduje zmniejszenie sztywności wynikowej K o około 21 kN/mm. Natomiast w wypadku podsypki o sztywności 40 kN/mm sztywność wynikowa K zmniejsza się zaledwie o 8,6 kN/mm. Zmniejszenie sztywności przekładki o 60 kN/mm powoduje znaczne zmniejszenie jej trwałości, więc w kontekście wysokich, uzasadnionych względami bezpieczeństwa wymagań odnośnie do trwałości przekładki, nie jest celowe stosowanie bardzo podatnych przekładek.

Według TSI [3] dla KDP sztywność dynamiczna przytwierdzeń pośrednich w torze betonowym nie powinna być większa od 150 kN/mm. W przytwierdzeniu pośrednim uzyskanie mniejszej sztywności statycznej lub dynamicznej jest prostsze, bo występują dwie warstwy sprężynujące: przekładka podszykowa i podpodkładkowa. Przy założeniu jednakowej sztywności dynamicznej obu przekładek, największa dopuszczalna wartość każdej przekładki wynosi 300 kN/mm. W praktyce przekładka podpodkładkowa – między podkładem a sztywną stalową podkładką – jest znacznie grubsza od przekładki podszykowej i jest głównym elementem amortyzującym w przytwierdzeniu, dlatego przekładka podszykowa może być sztywniejsza.

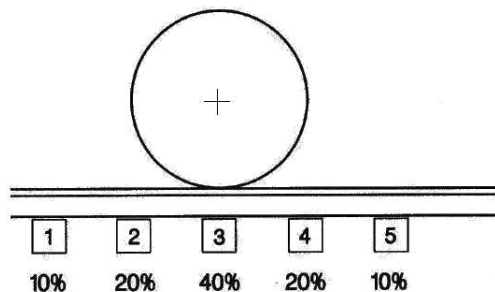
Trwałość elementów nawierzchni zależy przede wszystkim od względnych odkształceń i wzajemnych przemieszczeń. Im większe są ugięcia szyn, tym szybsza jest degradacja szyn oraz złączy szynowych, przekładek i podsypki. Amortyzacja toru zmniejsza natomiast skutecznie zużycie powierzchni tocznych szyn i kół pojazdów. Spośród wszystkich elementów amortyzujących, przekładka podszykowa jest najbardziej obciążona ze względu na jej małą powierzchnię i objętość w porównaniu z innymi elementami. Przekładka podpodkładkowa w przytwierdzeniu pośrednim ma na ogół powierzchnię około trzy razy większą od powierzchni roboczej przekładki podszykowej.

Pierwotną funkcją przekładki jest rozkład nacisków stosunkowo twardej stopki szyny na kruchą podszywową powierzchnię betonowych podpór szyny i jej ochrona przed stopniową degradacją. Ponadto konstrukcja przekładki powinna ułatwiać rozłożenie nacisków koła na kilku sąsiednich podkładach.

Nacisk koła albo kół dwóch lub trzech osi wózka kolejowego rozkłada się na kilku lub kilkunastu podkładach (rysunek 2) *K*. Siły poprzeczne występujące w kontakcie powierzchni tocznej koła z szyną albo obrzeża koła z szyną na łukach są również przenoszone przez elementy kilku sąsiednich przytwierdzeń jednocześnie. Na rysunku 3 przedstawiono realistyczny przykład skutecznego rozkładu nacisku koła w torze na podsypce [22]. Dzięki rozkładowi sił na pięć podkładów największe obciążenie środkowego podkładu pod kołem stanowi tylko 40% nacisku koła na szynę.



Rys. 2. Linia ugięcia szyny pod obciążeniem dwóch zestawów kołowych jednego wózka [9]



Rys. 3. Rozkład nacisków obciążenia od koła na 5 podkładów [22]

Przy ocenie geometrii przekładki oferowanej jako przekładka amortyzująca, warto sprawdzić liniowość statycznej charakterystyki ściskania. Przekładka o liniowej charakterystyce, lepiej rozkłada w czasie obciążenie dynamiczne od przekładki o charakterystyce silnie nieliniowej.

Do kompleksowej oceny przekładki jako amortyzatora bardziej miarodajna jest wartość sztywności dynamicznej. Sztywność dynamiczna elastomerów oraz wyrobów wykonanych z tych materiałów zależy od częstotliwości odkształceń względnych. Dlatego podając wartość sztywności dynamicznej, należy zawsze określić częstotliwość wymuszenia siłą harmoniczną i odkształcenia przekładki. W wypadku gumy, której własności reologiczne zostały najlepiej zbadane, do opisu własności dynamicznych w zakresie liniowym stosuje się model w postaci zespolonego modułu sztywności:

$$\bar{E} = E + j\omega E' \quad (3)$$

gdzie E jest statycznym modułem sprężystości, niezależnym od częstotliwości $f = \omega / 2\pi$. W ogólności model własności reologicznych elastomerów może być znacznie bardziej skomplikowany od przedstawionego liniowego modelu dwuparametrowego. Należy pamiętać, że sztywność dynamiczna, podobnie jak moduł sztywności, nie jest parametrem fizycznym ale transmitancją. Ilekroć jest mowa o sztywności dynamicznej przekładki jako parametrze liczbowym, przyjmuje się domyślnie wartość sztywności zdefiniowaną w normie [15].

Norma PN-EN 13146-9:2010 zaleca badanie sztywności dynamicznej przekładek i przytwierdzeń przy częstotliwości 5, 10 oraz 20 Hz. Sztywność dynamiczna jest średnią arytmetyczną sztywności wyznaczonych dla tych trzech częstotliwości. Zakres wymuszenia siłą harmoniczną określa odpowiednia norma serii PN-EN 13481.

Elastomery są bardzo sprężyste, ale mają dużą liczbę Poisson'a bliską 0,5, czyli są praktycznie nieściśliwe. Fizycznie jest niemożliwe uzyskanie względnego zmniejszenia grubości ściskanej płytki elastomerowej o wartości kilkudziesięciu procent, ponieważ zależność naprężeń ściskających od odkształceń jest bardzo silnie nieliniowa. Aby uzyskać duże ugięcie elastomerowej przekładki, należy odpowiednio ukształtować jej powierzchnie robocze, tzn. zaprojektować występy o odpowiednim współczynniku kształtu. Sztywność kształtek wykonanych z elastomerów zależy od współczynnika kształtu:

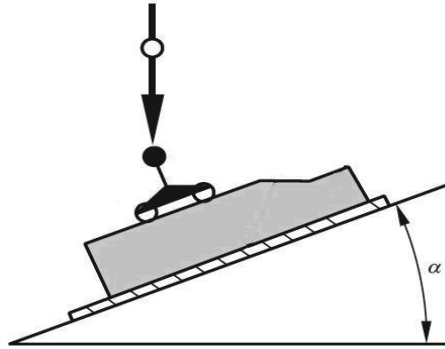
$$C_s = S_l / S_u \quad (4)$$

czyli stosunku pola S_l jednej z dwóch równoległych powierzchni obciążanych w wybranym kierunku do całkowitej powierzchni nieobciążonej S_u , inaczej swobodnej, która może ulec wybrzuszeniu. Im większy jest współczynnik kształtu, tym kształtka jest sztywniejsza. Jeśli swobodna powierzchnia jest bardzo mała w porównaniu z powierzchnią obciążaną element jest bardzo sztywny. Przykładem jest cienka płytka ściskana między równoległymi sztywnymi płytami albo wałek umieszczony w stalowej tulei.

Sztywność przekładki zależy od liczby występow na powierzchniach roboczych oraz od ich współczynników kształtu. Występy nie są swobodnymi kształtkami, ale są ograniczone więzami w postaci płytki stanowiącej podstawę lub średnik powierzchni roboczej przekładki. Niekorzystne konsekwencje występow na powierzchni roboczej to zwiększone lokalne naprężenia w przekładce i wzrost nacisków na powierzchnię podszytówą betonowej podpory [21].

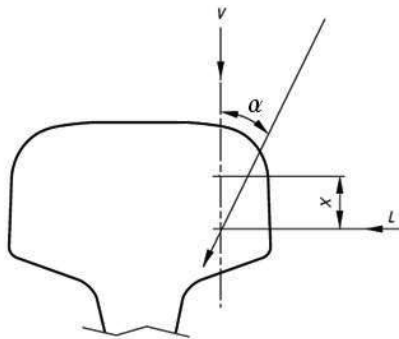
4. BADANIE EFEKTU OBCIĄŻEŃ POWTARZALNYCH

Badanie wykonuje się na stanowisku jak na rysunkach 4 i 5. Przed oraz po obciążeniu badanego przytwierdzenia działaniem 3 mln cykli harmonicznego siły, wykonuje się pomiary trzech parametrów: sztywności statycznej przytwierdzenia według [15], siły docisku według [13] oraz oporu podłużnego szyny w przytwierdzeniu według [10].



Rys. 4. Schemat stanowiska do badania skutków obciążeń powtarzalnych [12]

Badanie należy zakończyć rozmontowaniem zespołu przytwierdzenia w celu wizualnego zbadania elementów pod kątem pęknięcia, zużycia i trwałych odkształceń. Należy też sprawdzić moment każdego śrubowego połączenia i pewność zamocowania wszystkich elementów utwierdzonych w podporach.



Rys. 5. Miejsce przyłożenia i kierunek działania obciążenia badawczego według [12]

Wzrokowa ocena skutków powtarzalnych obciążeń jest ważną częścią badania. Jednak autorzy norm uznali, że należy też wprowadzić trzy pozornie bardziej obiektywne, ilościowe miary trwałości, tj. wyrażone w procentach względne zmiany parametrów przytwierdzeń. Przyrost sztywności przytwierdzenia nie może być większy od 25%, a zmiany siły docisku i oporu podłużnego szyny muszą być mniejsze od 20%.

4.1. Przemieszczenia badawcze inne niż przemieszczenia w torze

W normie [12] jest stwierdzenie, że w badaniu skutków obciążeń powtarzalnych „przytwierdzenia poddawane są cyklicznym przemieszczeniom typowym (ang. *representative*) dla przemieszczeń spowodowanych ruchem na torze kolejowym”. Faktycznie konfiguracja obciążeń, odkształceń i wzajemnych przemieszczeń elementów przytwierdzeń jest istotnie inna od tych występujących w torze.

Zgodnie z normą [12] bada się wyizolowane z toru przytwierdzenie z krótkim odcinkiem szyny o długości około 0,5 m. Szyna jest najważniejszym elementem konstrukcyjnym nawierzchni kolejowej. W kategoriach mechaniki i wytrzymałości materiałów szyna jest długą sprężystą belką, podpartą dyskretnie w co najmniej kilku sąsiednich przytwierdzeniach. Natomiast krótki swobodny odcinek szyny o długości około 0,5 m jest sztywny. Zastąpienie długiej sprężystej szyny sztywnym elementem oraz ruchomego obciążenia od koła obciążeniem harmonicznym, realizowanym przez stacjonarne siłowniki hydrauliczne – zmienia rozkład sił i nacisków działających na elementy przytwierdzenia.

Ze względu na opisaną niezgodność konfiguracji obciążeń i przemieszczeń w torze i w badaniu laboratoryjnym badanie trwałości wg normy [12] oraz tłumienia obciążeń uderzeniowych według [11] przytwierdzeń i przekładek o nietypowej, innowacyjnej konstrukcji są niemiarodajne. W szczególności chodzi tu o badania przytwierdzeń do podpór o specjalnym profilu części podszynowej w przekroju poprzecznym podpory oraz przekładki o zmiennej grubości i sztywności w przekroju podłużnym szyny.

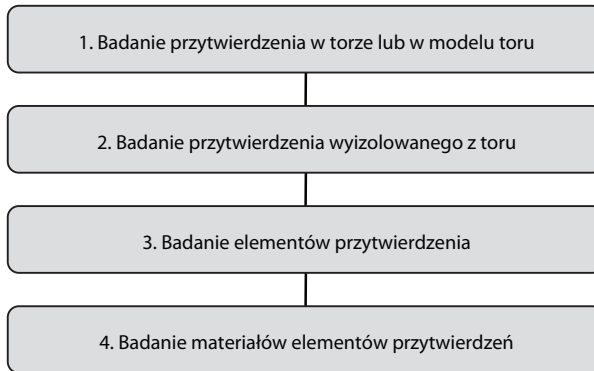
4.2. Równoczesne badanie trwałości wszystkich elementów przytwierdzeń

Analizę trwałości prototypowego rozwiązania podsystemu – w szczególności przytwierdzenia jako podsystemu toru kolejowego – można przeprowadzić różnymi metodami analityczno-eksperymentalnymi. Współczesna wiedza na temat zmęczenia i zużycia materiałów, elementów i zespołów jest niewystarczająca, aby ilościowo oceniać trwałość wyłącznie na podstawie obliczeń czy symulacji komputerowych. Dlatego w każdym przypadku konieczne są badania eksperymentalne. Metodyka badań trwałościowych zależy od wiedzy o badanym obiekcie i mechanizmach zniszczenia. Im mniejsza wiedza, tym więcej należy wykonać badań, a wyników badań nie można uogólniać.

Rysunek 6 ilustruje cztery możliwe poziomy badań trwałościowych zespołu przytwierdzenia jako podukładu złożonego układu, czyli toru. Badanie wyizolowanego podukładu będzie miarodajne, jeśli w laboratorium zostaną odtworzone obciążenia, odkształcenia i wzajemne przemieszczenia elementów podsystemu. Zdaniem autora w badaniu laboratoryjnej trwałości wg normy PN-EN 13146-4 ten warunek nie jest spełniony.

Tylko pozornie równoczesne badanie trwałości kompletnego, wyizolowanego z toru przytwierdzenia zamiast badania elementów czy próbek materiałów jest korzystne. Gdy

konstrukcja jest zasadniczo dobrze zaprojektowana, z wykorzystaniem analitycznych i numerycznych metod obliczeniowych, to badania trwałości jej elementów lub materiałów mogą być szybsze, tańsze, bardziej wiarygodne i miarodajne. Można wtedy zoptymalizować parametry badania.



Rys. 6. Cztery poziomy etapy eksperymentalnych badań trwałości przytwierdzeń

W przytwierdzeniu najmniej trwałe są elementy wykonane z gumy lub tworzyw sztucznych; przede wszystkim przekładki podszytowe, ponieważ są najbardziej obciążone. Elementy stalowe mają większą wytrzymałość. Ponadto, własności wytrzymałościowe stali, w tym własności zmęczeniowe, są bardziej stabilne temperaturowo i znacznie lepiej poznane, co stanowi podstawę do opracowania bardziej obiektywnych i pewnych procedur badania trwałości elementów stalowych. W świetle wiedzy o własnościach zmęczeniowych stali, liczba 3 mln cykli powtarzalnego obciążenia jest niewystarczająca do zbadania wytrzymałości zmęczeniowej stalowych sprężyn dociskowych, tzw. łapek. Należy wykonać co najmniej 5 mln cykli. Częstotliwość badania łapek może być większa od 4 Hz, ponieważ stalowe wyroby nie nagrzewają się tak łatwo jak elastomery, a ich własności nie zależą tak silnie od temperatury.

4.3. Bardzo duża wartość składowej poprzecznej obciążenia badawczego

Stosunek amplitudy siły poprzecznej do amplitudy siły pionowej, równy tangensowi kąta α (rys. 4 i 5), przyłożonych do odcinka szyny w badanym przytwierdzeniu jest bardzo duży. Na przykład w wypadku toru o dopuszczalnym nacisku osi 260 kN i najmniejszym promieniu łuku równym 150 m kąt α wynosi 33° [16]. Tylko na odcinkach torów o bardzo ostrych łukach mogą występować takie proporcje siły poprzecznej do siły normalnej [2, 9].

Ponadto, w torze siła poprzeczna jest równoważona przez siły reakcji w kilku sąsiednich przytwierdzeniach, natomiast na stanowisku laboratoryjnym krótki sztywny odcinek szyny przemieszcza się w kierunku zewnętrznej kotwy przytwierdzenia i obciąża ją

bezpośrednio lub pośrednio siłą znacznie większą niż w torze. Kotwy wewnętrzne – lub inne przytwierdzone elementy podpór – są natomiast w badaniu laboratoryjnym całkowicie odciążone.

4.4. Brak procedur wzorcowania obciążenia badawczego

Sposób przenoszenia obciążenia badawczego od głowicy hydraulicznego siłownika na szynę w przytwierdzeniu jest skomplikowany (rys. 5). Podczas badania siłownik pracuje w układzie sterowania siłą. Najmniejszą wartość harmoniczną siły określa norma [15], a największą – jedna z norm serii PN-EN 13481. Nie opracowano procedury kalibracji obciążenia w celu uzyskania wymaganych przemieszczeń odcinka szyny w przytwierdzeniu. W wypadku tak skomplikowanego łańcucha przenoszenia obciążenia badawczego wzorcowanie jest konieczne, aby wyniki uzyskane w różnych laboratoriach były porównywalne.

4.5. Przyrost sztywności przytwierdzenia jako miara jego trwałości

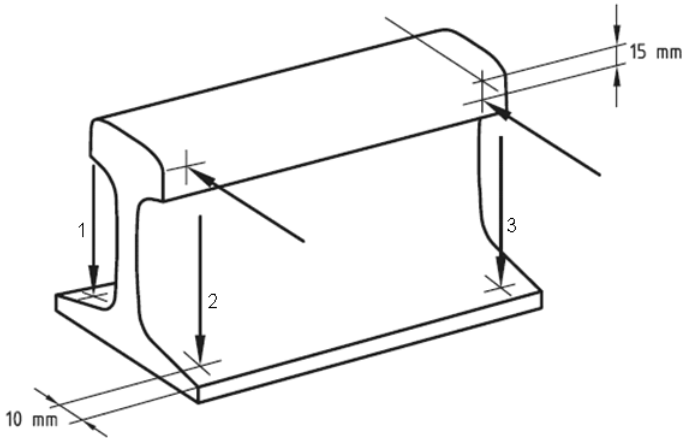
Jako ilościową miarę trwałości przyjęto zmianę wartości trzech mierzonych parametrów badanego przytwierdzenia: siły docisku, oporu podłużnego szyny oraz sztywności przytwierdzenia. Wymienione parametry przytwierdzenia nie są od siebie niezależne. Podstawową i najtrudniejszą do spełnienia ilościową miarą trwałości jest względna zmiana sztywności przytwierdzenia. Jednak sztywność przytwierdzenia nie została jednoznacznie zdefiniowana. Przeciwnie, opis procedury pomiarowej dopuszcza istotną niejednoznaczność wyniku pomiaru. Sztywność statyczną przytwierdzenia wyznacza się ze wzoru:

$$k_{SA} = \frac{F_{SA2} - F_{SA1}}{d_{SA}} \quad (5)$$

gdzie d_{SA} oznacza uśrednione przemieszczenie szyny w badanym przytwierdzeniu podczas jej obciążania siłą pionową o wartości od F_{SA1} do F_{SA2} . W oznaczeniach siły oraz przemieszczenia we wzorze (5) dolny indeks S oznacza *statyczny*, a indeks A oznacza zespół przytwierdzenia (ang. *assembly*). Symbol d_{SA} oznacza średnią wartość pionowych przemieszczeń czterech punktów stopki oznaczonych na rysunku 7.

Przytwierdzenie z zamocowanym krótkim, sztywnym odcinkiem szyny jest w kategoriach teorii maszyn sprężystym przegubem o 6 stopniach swobody. Podczas obciążania przegubu siłą pionową ściskającą, przyłożoną w środku głowki szyny, kątowe pochylenie odcinka szyny jest niestabilne. Norma [15] dopuszcza względne różnice pionowych przemieszczeń d_1, \dots, d_4 do 20%. Na przykład znaczne odchylenie od pionu osi symetrii przekroju poprzecznego szyny w prawo, gdy $d_2 = d_3 = 1,2d_{SA}$ oraz $d_1 = d_4 = 0,8d_{SA}$ w pomiarze przed cyklicznym obciążaniem i w lewo: $d_2 = d_3 = 0,8d_{SA}$ oraz $d_1 = d_4 = 1,2d_{SA}$ po obciążaniu 3 mln. cykli jest zgodne z normą [15]. W takim przypadku faktycznie przyj-

muje się wg normy [13] jako miarę trwałości przytwierdzenia względną różnicę dwóch różnych wielkości, tj. sztywności, którą można określić jako prawostronną i sztywności lewostronnej.

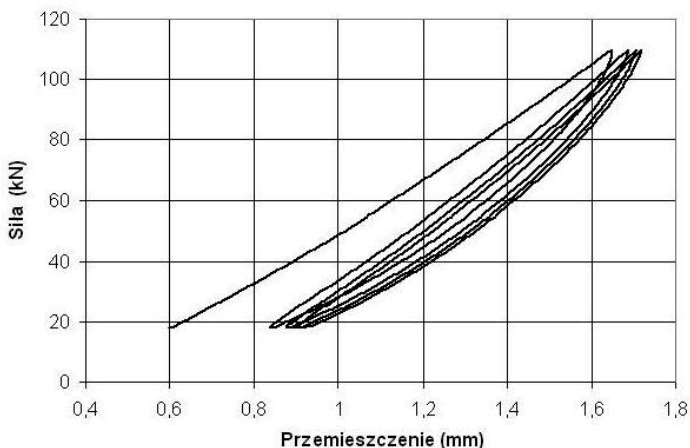


Rys. 7. Miejsca pomiaru przemieszczeń odcinka szyny [15]

Sztywność statyczną przekładki mierzy się w maszynie wytrzymałościowej [15]. Przekładkę umieszcza się między sztywnymi metalowymi płytami. Między płytami a powierzchniami roboczymi przekładki umieszcza się dodatkowo arkusze papieru ściernego. W tym badaniu rozkład nacisków jest lepiej kontrolowany i bardziej równomierny niż w badaniu kompletnego przytwierdzenia. Niepewność pomiaru przyrostu sztywności przekładki też może być duża, ale mniejsza niż w przypadku badania zmian sztywności przytwierdzenia.

Podczas pomiaru rejestruje się siłę ściskającą F_{sp} oraz ugięcie d_{sp} przekładki (ang. *pad*). Podczas badania sztywności statycznej przekładka jest czterokrotnie obciążana i odciążana siłą pionową (rys. 8). Wartość siecznej sztywności statycznej określa się na podstawie czwartej zarejestrowanej charakterystyki ściskania, tj. zależności siły od ugięcia. Zakres obciążeń, tzn. najmniejszą i największą wartość siły normalnej przyjmuje się w zależności od rodzaju toru oraz rodzaju przytwierdzenia wg odpowiedniej normy z serii PN-EN 13481. Na rysunku 8 jest widoczna typowa dla gumy i poliuretanów duża różnica między charakterystyką ściskania w pierwszym cyklu obciążania i odciążania w porównaniu z następnymi cyklami. Sztywność statyczna wyznaczona na podstawie charakterystyki podczas pierwszego obciążania może być o kilkadziesiąt procent mniejsza.

Gdyby uwzględnić wszystkie czynniki wpływające na wynik pomiaru przyrostu sztywności przytwierdzenia, to niepewność pomiaru przyrostu sztywności może być większa od znormalizowanego dopuszczalnego przyrostu 25%.



Rys. 8. Statyczna charakterystyka ściskania poliuretanowej przekładki

4.6. Mała wrażliwość sztywności przytwierdzenia na trwałe defekty

Zgodnie z normą [12] mierzy się przemieszczenia pionowe w czterech punktach zaznaczonych strzałkami na rysunku 7. Jeśli przemieszczenia nie różnią się między sobą o więcej niż 20%, to oblicza się ich wartość średnią d_{SA} . Ponieważ odcinek szyny w przytwierdzeniu jest sztywny, to wartość średnia czterech przemieszczeń jest przemieszczeniem pionowym środka odcinka szyny. Pomiar przemieszczenia w środku odcinka szyny powoduje uśrednienie wpływu miejscowych defektów na wynik pomiaru. Nawet znaczne miejscowe defekty, np. zmęczeniowe pęknięcia na obrzeżach przekładki nie wpływają znacząco na wynik pomiaru zmiany sztywności przytwierdzenia. Natomiast równomierne trwałe usztywnienie materiału, efekt charakterystycznego dla elastomerów trwałego odkształcenia po ściskaniu (ang. *compression set*), powoduje znaczny wzrost sztywności przytwierdzenia.

Zmiany sztywności przytwierdzenia i przekładki zależą przede wszystkim od materiału. Wartość usztywnienia można oszacować na podstawie badań małych próbek materiałowych, np. według normy [20] lub na podstawie prostego i taniego badania przekładki umieszczonej na pewien czas w specjalnej prasie albo uniwersalnej maszynie wytrzymałościowej.

4.7. Wpływ temperatury i własności reologicznych na wynik pomiaru

Cykliczne obciążanie badanego przytwierdzenia oraz pomiar jego parametrów przed i po wykonaniu 3 mln cykli, wykonuje się w laboratorium w tzw. temperaturze otoczenia (23 ± 5)°C. Praktycznie oznacza to, że różnica temperatur może wynosić nawet 10°C. W wypadku przekładek wykonanych z miękkich elastomerów różnica 10°C może bardzo

zaburzyć wynik pomiaru trwałego efektu obciążeń powtarzalnych. Natomiast żądanie wykonania obu pomiarów w tej samej temperaturze zwiększyłoby koszty badania.

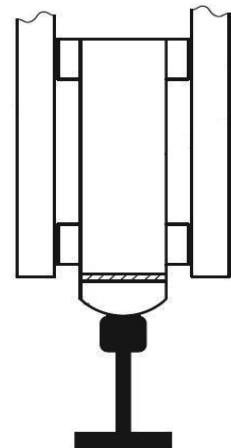
Badania parametrów materiałowych elastomerów wykonuje się w węższych zakresach temperatur. Twardość mierzy się w temperaturze $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ [19]. Jeśli przedział $\pm 2^\circ\text{C}$ jest odpowiedni do wyznaczenia twardości w stopniach Shore'a podawanej z dokładnością do 1 stopnia, to na pewno jest zbyt duży w wypadku pomiaru sztywności przekładki do oceny jej trwałości. Istnieją przesłanki, aby żądać wykonania pomiaru sztywności przytwierdzenia w tej samej temperaturze przed obciążaniem 3 mln. cykli i po zakończeniu badania. W laboratoriach bez automatycznej regulacji temperatury otoczenia wykonanie takich badań, szczególnie latem, jest faktycznie niemożliwe.

Przekładki gumowe lub poliuretanowe mają bardzo silne własności reologiczne. Czas pełnej relaksacji naprężeń jest praktycznie nieskończenie długi. Dlatego wynik pomiaru sztywności statycznej lub dynamicznej przekładki zależy od historii jej obciążania w bardzo długim czasie poprzedzającym pomiar. W normie [12] jest wymóg, aby mierzyć sztywność przytwierdzenia po 16 godzinach stabilizacji w stałych warunkach otoczenia bez obciążenia. Nie oznacza to jednak, że dla wszystkich elastomerów po tym czasie następuje stabilizacja własności statycznych i dynamicznych, co może być dodatkowym źródłem błędu przyrostu sztywności przytwierdzenia jako miary laboratoryjnej trwałości.

5. OKREŚLENIE TŁUMIENIA OBCIĄŻEŃ DYNAMICZNYCH

Jeśli producent albo dostawca przytwierdzeń lub przekładek oferuje swoje produkty jako amortyzujące dynamiczne obciążenia pochodzące od taboru, to należy sprawdzić w badaniu wg [11], do której z trzech kategorii ten wyrób należy. Współczynnik tłumienia (ang. *impact load attenuation*) wyznacza się według PN-EN 13146-3. W sensie fizycznym wartość tego współczynnika nie jest miarą rozpraszania energii, ale miarą osłabienia maksymalnej siły uderzenia w podporę szyny w badanym przytwierdzeniu w porównaniu z efektem uderzenia w przypadku zastosowania twardej przekładki odniesienia o sztywności statycznej większej od 500 kN/mm. Obciążenie uderzeniowe jest realizowane za pomocą spadającej pionowo masy (rys. 9). Tensometryczny pomiar naprężeń gnących w podkładzie umożliwia ocenę własności amortyzujących przytwierdzenia. W badanym przytwierdzeniu zamocowany jest krótki, swobodny odcinek szyny.

W tym badaniu podkład z badanym przytwierdzeniem jest umieszczony na warstwie podsypki. Według projektu nowej wersji normy PN-EN 13146-3 podkład może być też umieszczony na grubej warstwie gumy o odpowiedniej sztywności.



Rys. 9. Schemat stanowiska do pomiaru współczynnika tłumienia [11].

Do oceny własności amortyzujących przekładki „współczynnik tłumienia” jest prawdopodobnie w sensie fizycznym bardziej miarodajny od sztywności dynamicznej wyznaczonej według [15], ponieważ w widmie impulsu uderzenia spadającej masy występują składowe o wielu częstotliwościach. Jednak dokładność pomiaru tego współczynnika jest znacznie mniejsza od dokładności pomiaru sztywności dynamicznej. Współczynnik tłumienia wyznacza się według wzoru:

$$a = (1 - \Delta\varepsilon/\Delta\varepsilon_r) \times 100\%, \quad (6)$$

gdzie $\Delta\varepsilon$ oznacza – mierzony tensometrem, uśredniony dynamiczny przyrost względnego wydłużenia w określonych miejscach podkładu, w wypadku umieszczenia w przytwierdzeniu badanej przekładki, a $\Delta\varepsilon_r$ oznacza przyrost względnego wydłużenia w wypadku umieszczenia w przytwierdzeniu twardej przekładki odniesienia. Współczynnik a określa, jaką część obciążenia uderzeniowego amortyzuje przekładka.

Jeśli współczynnik a jest większy od 30%, to przytwierdzenie z przekładką kwalifikuje się jako przytwierdzenie o wysokim współczynniku tłumienia. Jeśli jest większy od 15% – jako przytwierdzenie o średnim współczynniku tłumienia. Z tej klasyfikacji można wnioskować, że przekładki o współczynniku a znacznie większym od 30% stosuje się rzadko, w przeciwnym wypadku wprowadzono by więcej klas przekładek i przytwierdzeń. Niektórzy producenci oferują przekładki o współczynniku a większym od 50%. Sposób pomiaru tego współczynnika jest skomplikowany i nie ma dowodów, że wszystkie laboratoria wyznaczają wartości współczynników tłumienia w identyczny sposób. Nie jest też pewne, czy wszystkie oferowane bardzo podatne przekładki spełniają wymaganie trwałości laboratoryjnej.

Na podstawie zmierzonego współczynnika osłabienia obciążenia uderzeniowego a nie można nawet w przybliżeniu oszacować, jaka będzie odpowiedź dynamiczna toru z badanymi przytwierdzeniami i czy konstrukcja przytwierdzenia oraz samej przekładki ułatwia, czy utrudnia rozkład nacisków na sąsiednie podpory (rys. 5). Przyczyna jest taka sama, jak w badaniu laboratoryjnej trwałości, tzn. zastąpienie długiej szyny podpartej w kilku przytwierdzeniach krótkim, sztywnym odcinkiem o długości około 0,5 m. Stanowisko jak na rysunku 9. byłoby bardziej odpowiednie do badania amortyzatorów pod stacjonarną maszynę udarową. Wnioskowanie o własnościach amortyzacyjnych toru kolejowego z badanymi przytwierdzeniami jest niemożliwe, ponieważ ostateczny efekt amortyzacji zależy od ugięcia szyny w torze.

6. WNIOSKI

Normy serii PN-EN 13146 oraz PN-EN 13481, opracowane przez CEN, powinny być zmienione. Badania laboratoryjne wg tych norm nie są dobrym narzędziem do projektowania przytwierdzeń oraz ich kwalifikacji do badań eksploatacyjnych i eksploatacji w torach kolejowych. Badania kompletnych przytwierdzeń na podkładach lub innych

podporach wymagają kosztownych, specjalistycznych stanowisk o dużych gabarytach, a wnioski wynikające z tych badań są niepewne ze względu na omówione istotne różnice między konfiguracją naprężeń, odkształceń i przemieszczeń w torze i na stanowiskach badawczych.

Zdaniem autora należy opracować nowe, lepsze procedury laboratoryjnego badania trwałości przytwierdzeń i/lub elementów przytwierdzeń. W wypadku badania kompletnych przytwierdzeń – pod obciążeniem ruchomym albo nieruchomym – odcinek szyny powinien być podparty w co najmniej trzech przytwierdzeniach tego samego typu, a swobodne końce odcinka szyny powinny być umieszczone w specjalnie zaprojektowanych podporach (tłumikach).

Przed wszystkim jednak należy przyjąć inne, nie budzące kontrowersji obiektywne i pewne ilościowe miary trwałości przytwierdzeń, albo poprzestać na dokładnej wzrokowej ocenie skutków obciążeń powtarzalnych. W szczególności, względny przyrost sztywności przytwierdzenia k_{SA} nie jest obiektywną miarą trwałości przytwierdzenia. Czasowo w celu uniknięcia kontrowersji odnośnie do wpływu temperatury na wynik pomiaru trwałości, można wprowadzić korzystną dla producenta zasadę, że pomiar sztywności przytwierdzenia po obciążeniu 3 mln. cykli wykonuje się w temperaturze równej lub większej od temperatury pomiaru sztywności przed powtarzalnym obciążeniem. Zmiana sztywności przytwierdzenia jest prawdopodobnie najsilniej skorelowana z trwałym odkształceniem po ścisaniu, mierzonym na kształtkach elastomerów, na przykład według [20].

Ze względu na opisane wyżej ograniczenia laboratoryjnych procedur badawczych należy przyjąć zasadę, że tylko typowe konstrukcyjne rozwiązania przekładek kwalifikuje się do eksploatacji według norm CEN. W wypadku nietypowych przekładek, producent oferujący innowacyjne rozwiązania powinien udowodnić, że jego produkt jest zaprojektowany pod kątem obciążeń eksploatacyjnych w torze, a nie pod kątem obciążeń badawczych.

Konstruktorzy przytwierdzeń powinni stosować przekładki z elastomerów, które mają małe wartości trwałego odkształcenia po ścisaniu w celu uniknięcia niepowodzenia w kosztownym i długotrwałym badaniu według normy [12]. Zmiany parametrów przytwierdzenia: sztywności statycznej, siły docisku oraz oporu podłużnego szyny będą wtedy mniejsze. Oczywiście elastomery powinny być również odporne na pękanie, rozciąganie, rozdzieranie oraz ścieranie.

Zdaniem autora, nie ma fizycznych, ekonomicznych ani formalnych przesłanek do stosowania bardzo podatnych przekładek w torach na podsypce kolei konwencjonalnej. W tym przypadku ośrodkiem dobrze amortyzującym obciążenia dynamiczne powinna być sama podsypka. Jeśli konieczna jest dodatkowa warstwa amortyzująca, to zamiast bardzo podatnych przekładek podszytowych, trwalszym, pewniejszym i skuteczniejszym rozwiązaniem będzie zastosowanie przytwierdzeń pośrednich z przekładkami podpodkładkowymi albo umieszczenie dodatkowej warstwy amortyzującej pod podkładkami.

Należy rozwijać numeryczne narzędzia modelowania toru oraz przekładki w przytwierdzeniu. Modelowanie dynamiczne oddziaływania toru z taborem w pełnym zakresie częstotliwości to bardzo złożone zagadnienie i nie można oczekiwać, że w bliskiej przyszłości sprawdzone modele dynamiczne będą wykorzystywane w projektowaniu toru. Natomiast opracowanie zweryfikowanych eksperymentalnie statycznych modeli toru i przytwierdzeń jest zadaniem trudnym, ale możliwym do wykonania i koniecznym, aby projektowanie nawierzchni i jej elementów było oparte na ilościowej fizycznej analizie.

BIBLIOGRAFIA

1. *Commission Decision 2008/217/EC of 20 December 2007 concerning a technical specification for interoperability relating to the infrastructure sub-system of the trans-European high-speed rail system.*
2. *Commission Decision 2011/275/EU of 26 April 2011 concerning a technical specification for interoperability relating to the 'infrastructure' subsystem of the trans-European conventional rail system.*
3. *Commission Decision of 30 May 2002 concerning the technical specification for interoperability relating to the infrastructure subsystem of the trans-European high-speed rail system referred to in Article 6(1) of Council Directive 96/48/EC.*
4. *Design of new lines for speeds of 300÷350 km/h, State of the art first report, International Union of Railways (UIC), High Speed Department, 2001.*
5. *Directive 2004/50/EC of the European Parliament and of the Council of 29 April 2004 amending Council Directive 96/48/EC on the interoperability of the trans-European high-speed rail system and Directive 2001/16/EC of the European Parliament and of the Council on the interoperability of the trans-European conventional rail system.*
6. Iwnicki S.: *Handbook of railway vehicle dynamics* 2006 CRC/Taylor & Francis, 2006.
7. Kish A., Wormley D., Samavedam G.: *Fundamentals of track lateral shift for high-speed rail applications.*
8. Kowalska Z.: *Vibro-impacts induced by irregular rolling surfaces of railway rails and wheels*, Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 46, 1, 205÷221, Warszawa, 2008.
9. Lu S., Arnold R., Farritor S., Fateh M., Carr G.: *On the relationship between load and deflection in railroad track structure*, http://www.arena.org/files/library/2008_Conference_Proceedings.
10. PN-EN 13146-1:2003 Cz. 1: *Określenie oporu podłużnego szyny (oryg.).*
11. PN-EN 13146-3:2003 Cz. 3: *Określenie tłumienia obciążeń dynamicznych (oryg.).*
12. PN-EN 13146-4:2003 Cz. 4: *Skutki obciążeń powtarzalnych (oryg.).*
13. PN-EN 13146-7:2003 Cz.7: *Określenie siły docisku (oryg.).*
14. PN-EN 13146-8:2005 Cz. 8: *Badania eksploatacyjne.*
15. PN-EN 13146-9:2010 Cz. 9: *Określenie sztywności (oryg.).*

16. PN-EN 13481-2:2004 Cz. 2: *Systemy przytwierdzeń do podkładów betonowych.*
17. PN-EN 13481-5:2004 Cz. 5: *Systemy przytwierdzeń w torze o nawierzchni bezpodsypkowej.*
18. PN-EN 13481-7:2004 Cz. 7: *Systemy przytwierdzeń specjalnych w rozjazdach i skrzyżowaniach oraz szyn kierownic (oryg.).*
19. PN-EN ISO 868:2005 *Tworzywa sztuczne i ebonit. Oznaczanie twardości metodą wciśnięcia z zastosowaniem twardościomierza (twardość metodą Shore'a).*
20. PN-ISO 815:1998, *Guma i kauczuk termoplastyczny. Oznaczenie odkształcenia trwałego po ścisnaniu w temperaturze otoczenia, podwyższonej lub niskiej.*
21. Sładkowski A.: *Modeling of the deformation of elastic pads for rail fastenings*, „Transport Problems”. T. 4, 2009, z. 1.
22. *Technical Instructions Railroad Design and Rehabilitation* TI 850-02, Air Force AFMAN 32-1125(I), US Army Corps of Engineers, 2000.