

## BADANIA NIEZAWODNOŚCI PRZYTWIERDZEŃ SZYNOWYCH

### Streszczenie

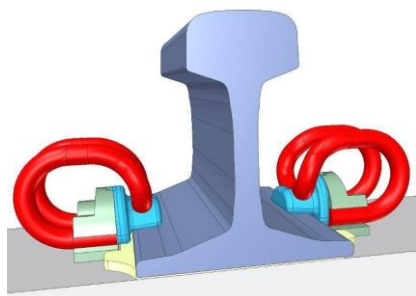
W artykule omówiono źródła uszkodzeń oraz charakterystykę przytwierdzenia typu SB i jego poszczególnych elementów, jako generatorów uszkodzeń. Przedstawiono również wstęp do analizy oceny niezawodności przytwierdzeń szynowych na podstawie badań laboratoryjnych i poligonowych przytwierdzenia sprężystego szyn do podkładów strunobetonowych typu SB.

### WSTĘP

System przytwierdzenia sprężystego szyn do podkładów strunobetonowych typu SB jest w kraju powszechnie stosowany od końca lat 80-tych XX wieku. Przez ten czas, czyli przez ponad 27 lat, niewiele zostało w nim zmienione. Modyfikacje elementów polegały przede wszystkim na optymalizacji kształtu łapki dociskowej i elektroizolacyjnej wkładki dociskowej, mających na celu obniżenie naprężeń kontaktowych na styku tych dwóch elementów. Pozostałe detale systemu przytwierdzenia pracowały poprawnie w warunkach eksploatacyjnych panujących w torach będących własnością największego krajowego zarządcy infrastruktury [1]. System SB cieszy się ogólną dobrą oceną i wysoką niezawodnością określaną przez pryzmat bezoobslugowości systemu. W celu określenia danych analitycznych charakteryzujących niezawodność systemu przytwierdzenia SB przyjrano się stanom poszczególnych elementów oraz zmianie podstawowych parametrów mechanicznych w funkcji czasu.

Przy doborze cech przytwierdzeń sprężystych, istotne znaczenie mają właściwości materiałowe i geometryczne przekładek i wkładek elektroizolacyjnych, wchodzących w skład przytwierdzenia a także dopasowanie łapki dociskowej o znanej charakterystyce sprężystości. Tworzywo przekładek powinno zapewniać odpowiedni współczynnik tarcia (istotny ze względu na opór podłużny), sprężystość i wystarczającą trwałość [5]. Analiza literatury wskazuje, że na przełomie minionych dekad zostało podjętych wiele prac badawczych oraz eksperymentów skupiających się na właściwościach przekładek podszynowych oraz na problematyce ich trwałości.

Materiał elektroizolacyjnych wkładek dociskowych (PA6GF15) jest natomiast wyeksponowany na skrajne warunki środowiskowe jak również jest poddawany dużym naprężeniom kontaktowym oraz przenosi siłę docisku z łapki na szynę o wartości ok. 12 kN. Od wkładki elektroizolacyjnej oczekuje się wysokiej trwałości w przeniesieniu siły docisku łapki sprężystej oraz odporności na przemieszczenia poziome szyny, które są najczęstszą przyczyną uszkodzeń wkładek.



Rys. 1. Model przytwierdzenia typu SB [4].

Materiał łapki sprężystej podlega w trakcie eksploatacji bardzo dużym naprężeniom, które po zapięciu łapki w systemie mocowania mogą przekraczać 1000 MPa. Do tego dochodzą obciążenia udarowe oraz ekstremalne pochodzące np. od niedokładności wymiarowych wykonania poszczególnych detali. Dlatego na materiał tego wyrobu stosuje się standardowo stal z gatunku 50S2. Łapka sprężysta jest drugim po przekładce podszynowej generatorem ilości uszkodzeń dla kompletnego systemu przytwierdzenia.

Poza wymienionymi wcześniej elementami, według definicji podanej w Technicznej Specyfikacji Interoperacyjności odnoszącej się do podsystemu Infrastruktura, w skład elementu podsystemu pod nazwą „system przytwierdzenia” wchodzi również:

- rodzaj szyny,
- typ podkładu
- elementy specjalne (w omawianym przypadku jest to kotwa żeliwna zatopiona w podkładzie strunobetonowym).

W niniejszym artykule skupiono się na wpływie elementów strictly sprężystych na niezawodność mocowania szynowego.

### 1. METODA BADAŃ

W warunkach laboratoryjnych stosowane są 2 metody badań właściwości przytwierdzeń podszynowych. Pierwsza metoda polega na bezpośrednim pomiarze ugięcia pod obciążeniem wyrobu zamocowanego w sztywnym układzie pomiarowym (rys. 2), zgodnie z metodyką określoną w normie PN-EN 13146-9+A1:2012 [7]. Sposób ten pozwala porównać między sobą różne wyroby pod wybranym obciążeniem osiowym [1].

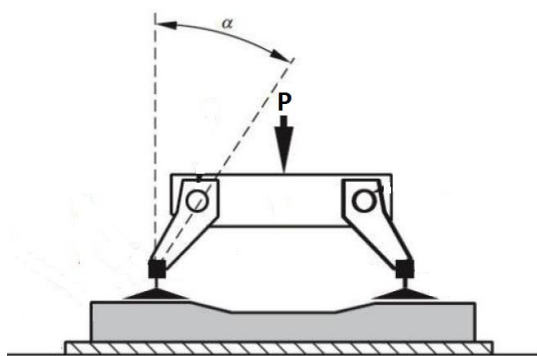


Rys. 2. Schemat pomiaru sztywności wyizolowanej przekładki podszynowej realizowany w Instytucie Kolejnictwa.

Szczegółowa procedura badawcza polega na uzyskaniu charakterystyki w postaci histerezy przy statycznym i dynamicznym ścisaniu. Siła minimalna w czasie badania jest równa minimalnej teoretycznej sile ściskającej przekładkę ( $F_{LFP1}$ ) po zapięciu jej w

węzle przytwierdzenia i wynosi 18 kN. Maksymalna siła ściskająca przekładkę ( $F_{LFPmax}$ ) wynosi 85 kN, natomiast siła obliczeniowa równa  $0,8F_{LFPmax}$ , wynosząca 68 kN symuluje nacisk taboru o nacisku osiowym 260 kN/oś powiększonym o wartość reakcji łapek sprężystych [1].

Druga metoda polega na montażu kompletnego systemu przytwierdzenia i obciążeniu go siłą pionową od wartości  $F_{SA1}$  równej 1 kN do wartości  $F_{SAmax}$  równej 64 kN według normy [7], natomiast wartość siły obliczeniowej równa  $0,8F_{LFPmax}$  i wynosząca 51,2 kN odzwierciedla siły oddziaływujące w trakcie eksploatacji toru kategorii C lub D według PN-EN 13481-2:2012 [8].



Rys. 3. Schemat stanowiska do obciążeń powtarzalnych systemów przytwierdzeń według PN-EN 13146-4 [9].

bie metody pomiarowe sprowadzają się do oznaczenia sztywności elementu z tworzywa sztucznego, przy czym wartości sztywności pionowej uzyskiwane w złożonym systemie będą zawsze wyższe z uwagi na dodatkową reakcję pochodzącą od zamocowanych łapek sprężystych.

Oprócz wymienionych wyżej sposobów określania sztywności w ramach badań laboratoryjnych wykonywane są również obciążenia zmęczeniowe, symulujące ciągły przejazd taboru. Jest to kluczowa próba trwałości przytwierdzenia z uwagi na ekstremalne wartości obciążeń (w tym przypadku dla  $P_{max} = 260$  kN/oś) i sposób ich przykładania charakterystyczny dla przejazdu pociągu po łuku o określonym promieniu (rys nr 3 dla przypadku  $\alpha=26^\circ$  i  $r_{min} = 400$  m).

Przed próbą zmęczeniową i po jej zakończeniu sprawdzane są dodatkowe właściwości mechaniczne przekładające się na bezpieczeństwo eksploatacji systemu przytwierdzenia. Podstawowe próby obejmują sprawdzenie siły docisku oraz oporu podłużnego szyny względem podkładu.

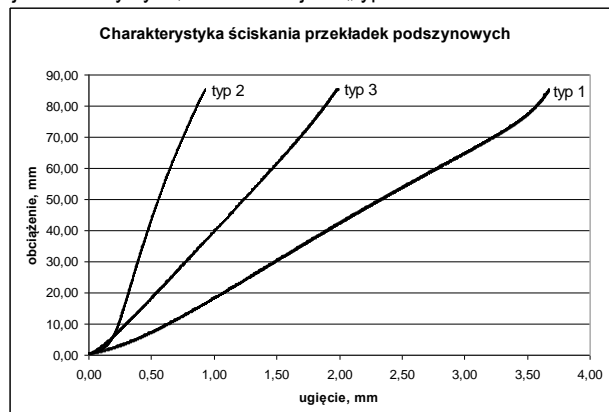
Jak już wcześniej napisano, trwałość i stabilność parametrów pracy systemu przytwierdzenia, a zatem i jego niezawodność, są determinowane przez elementy sprężyste i to ich trwałość w znacznej mierze przekłada się na zmianę parametrów pracy przytwierdzenia. Od systemu przytwierdzenia oczekuje się:

- wysokiej sprężystości,
- odporności na skrajne obciążenia w warunkach laboratoryjnych,
- odporności na obciążenia eksploatacyjne dla ruchu mieszane-go.

## 2. WYNIKI BADAŃ

W celu zobrazowania różnorodności rozwiązań materiałowych i kształtowych, na rysunku 4 przedstawiono zestawienie krzywych ugięcia z pierwszego obciążenia, symulującego montaż przekładki w systemie przytwierdzenia i pierwsze obciążenia eksploatacyjne. Zaprezentowano tu skrajne rozwiązania, gdzie jako „typ 2” oznaczona jest charakterystyka ściskania jednej z najsztwniejszych przekładek stosowanych w systemie przytwierdzenia SB, natomiast

na drugim biegunie znajduje się bardzo podatna przekładka o miękkiej charakterystyce, oznaczona jako „typ 1”.

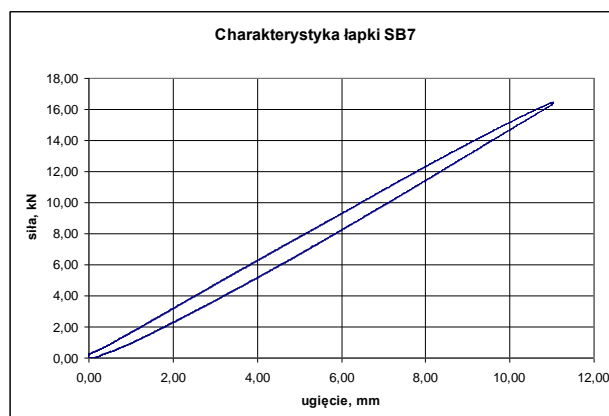


Rys. 4. Wykres charakterystyki sztywności dla 3 różnych rozwiązań kształtu przekładki podszynowej.

Z krzywych ugięcia pochodzących z pierwszego obciążenia obliczono sztywności pionowe poszczególnych przekładek w zakresie obciążenia 18-68 kN, i tak:

- przekładka typ 1 - 23,2 MN/m,
- przekładka typ 2 - 113,6 MN/m,
- przekładka typ 3 - 43,5 MN/m.

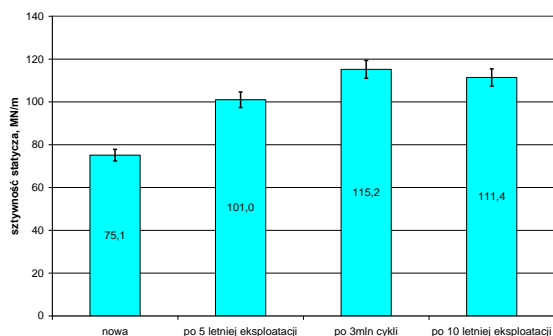
Elementem tworzącym reakcję docisku szyny do podkładu i ściskającej przekładkę będzie łapka sprężysta typu SB7, posiadająca największą siłę docisku z obecnie stosowanych rodzajów i jednocześnie zgodna z Warunkami Technicznymi Wykonania i Odbioru [6]. Wymagana sztywność łapek została określona przez wspomniany dokument na poziomie  $C = 1,47 \pm 10\%$  [kN/mm]. Rysunek nr 5 przedstawia doświadczalną charakterystykę łapki typu SB7 o obliczonej sztywności  $C = 1,51$  kN/mm i sile docisku równej 11,3 kN.



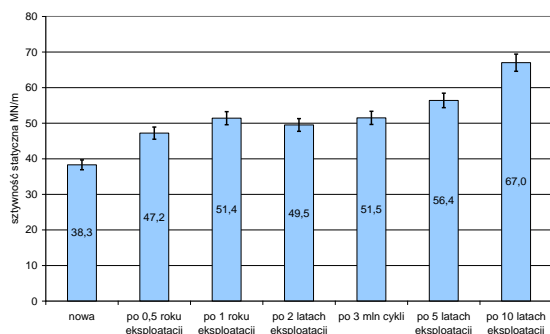
Rys. 5. Charakterystyka sprężystości nowej łapki typu SB7

Na wynik prób laboratoryjnych przytwierdzeń eksploatowanych składa się seria wykresów zmian poszczególnych parametrów eksploatacyjnych w funkcji przeniesionego obciążenia lub w funkcji czasu, ponieważ nie zawsze znane są informacje o przeniesionym obciążeniu danej linii liczonych w Tg. Do badań laboratoryjnych dostarczane były kompletne elementy składowe przytwierdzeń po określonym czasie eksploatacji. Badania były wykonywane w każdym przypadku na tym samym podkładzie w celu wyeliminowania rozbieżności wyników pochodzących od niejednorodności wysokości położenia kotew względem podkładu.

Na rysunkach nr 6 i 7 przedstawiono przykładowe wyniki badań sztywności quasi statycznej systemów przytwierdzenia oraz samej przekładki po różnym czasie eksploatacji.



**Rys. 6.** Wykres zmiany sztywności statycznej wyizolowanej przekładki podszynowej w funkcji czasu.



**Rys. 7.** Wykres zmiany sztywności statycznej systemu przytwierdzenia w funkcji czasu.

Na rysunkach nr 6 i 7 widoczny jest efekt wstępnego usztywnienia systemu przytwierdzenia powodujący spadek elastyczności i spadek siły docisku. W późniejszym okresie widoczna jest stabilizacja tych wartości i tendencja do łagodniejszego przyrostu sztywności w czasie eksploatacji. Tendencja ta jest ogólnie ujmując podobna dla wszystkich rodzajów systemów przytwierdzeń typu SB, stąd na podstawie wyników badań jednego rodzaju, tendencję tą można aproksymować zachowując odpowiednie współczynniki.

### 3. ŹRÓDŁA USZKODZEŃ

Źródła uszkodzeń przytwierdzeń szynowych można podzielić na uszkodzenia mechaniczne oraz na uszkodzenia funkcyjne. Przyczyną uszkodzeń obu rodzajów jest zasadniczo zużycie eksploatacyjne, lecz z pewnymi wyjątkami. Uszkodzenia mechaniczne są co do zasady łatwo wykrywalnymi uszkodzeniami w trakcie czynności diagnostycznych stanu toru ponieważ są one widoczne nieuzbrojonym okiem. Do uszkodzeń tego typu należy przede wszystkim zaliczyć:

- zniszczenie/degradacja przekładki podszynowej,
- zniszczenie/degradacja elektroizolacyjnej wkładki dociskowej,
- pęknięcie łapki sprężystej,
- pęknięcie kotwy żeliwnej (równoznaczne z uszkodzeniem podkładu).

Uszkodzenia funkcyjne odnoszą się tylko do systemu przytwierdzenia, jako do całości i są trudno wykrywalne bez specjalistycznej diagnostyki, ponieważ co do zasady należałoby sprawdzić właściwości mechaniczne systemu, co w warunkach eksploatacyjnych jest niemożliwe do wykonania. Można tutaj pokusić się o pewne uproszczenia lub szukać związków i prawidłowości między np. stanem toru a stanem przytwierdzenia. Zakres ugięcia pod obciążeniem przekładek podszynowych i jednocześnie wielkość ugięcia kabłąka łapki sprężystej należy rozpatrywać przede wszystkim przez pryzmat punktu pracy, w którym łapka dociskowa w warunkach statycznych jest w stanie dociskać szynę do podkładu z siłą

co najmniej 8 kN, co na pojedyncze przytwierdzenie daje siłę minimalną 16 kN. Należy tutaj wspomnieć, że w warunkach dynamicznych ( $f > 10\text{Hz}$ ) sztywność łapki jest zauważalnie wyższa. Do celów naukowych przyjęto kryterium, które twierdzi, że granicą uszkodzenia funkcyjnego jest spadek wartości oporu podłużnego systemu przytwierdzenia poniżej wartości 9 kN. Siła ta odpowiada minimalnej wymaganej przez dokumenty normatywne wartości oporu podłużnego szyny względem podkładu dla torów o prędkości maksymalnej powyżej 250 km/h i stanowi ekwiwalent siły docisku o wartości ok. 16 kN. Spadek wartości oporu podłużnego poniżej wskazanej wartości może stanowić poważne zagrożenie dla stabilności rusztu szynowego, co potwierdza słuszność przyjętego kryterium.

### 4. OCENA NIEZAWODNOŚCI

Pierwsze opracowanie wskaźników niezawodności systemu przytwierdzenia SB opracowano po próbach doświadczalnych na okręgu doświadczalnym Wszeczwiązkowego Instytutu Naukowo-Badawczego Kolejnictwa (WNIŻT) znajdującego się w rejonie stacji Szczebinka pod Moskwą. Na poligon doświadczalny składał się odcinek o długości 162,5 m w łuku o promieniu 600 m. Podstawowym celem było określenie uszkodzeń elementów składowych systemu SB3 do przejścia obciążenia 1200 Tg. W Tabeli przedstawiono zestawienie uszkodzeń po przeniesieniu obciążenia 800 Tg.

**Tab 1.** Uszkodzenia elementów mocowania po przeniesieniu obciążenia 800 Tg. [3]

Rodzaj elementu	Ilość elementów	Ilość uszkodzeń	% uszkodzeń
Podkład i kotwa	283	2	0,71
Łapka sprężysta	1132	11	0,97
Wkładka izolacyjna	1132	123	10,87
Przekładka podszynowa	566	190	33,57

Na uszkodzenia łapek sprężystych składały się przede wszystkim trwałe odkształcenia od wielokrotnego montażu, natomiast złamania stanowiły jedynie 0,09% badanej populacji. Wkładki elektroizolacyjne podlegały nie tylko zużyciu, co pęknięciom i rozkruszeniu przede wszystkim w toku zewnętrznym pod naciskiem krawędzi i ruchów poziomych stopki szyny. W ten sposób uszkodzeniom uległo 88,6% spośród 123 sztuk. Przekładki podszynowe ulegały starciom powierzchni, przetarciom, pęknięciom lub rozerwaniom. Nie podano przy tym udziału procentowego poszczególnych rodzajów uszkodzeń. Podkłady strunobetonowe ulegały jedynie miejscowym pęknięciom lub wykruszeniom betonu w strefie kotwy. Nie stwierdzono uszkodzeń samej kotwy, co potwierdza jej dobrą konstrukcję oraz wykonanie.

Oceny ilościowe przeprowadzono oddzielnie dla każdej części składowej, podając następujące parametry [3]:

$Q_t$  – wskaźnik trwałości charakteryzujący obciążenie powierzchni w chwili pojawienia się uszkodzeń, wyrażony w Tg,

$Y$  – wskaźnik średniej względnej częstości uszkodzeń w przyjętym przedziale obciążeń od 0 do  $Q_b$ , wyrażony w %/100Tg,

$J$  – wskaźnik średniej intensywności uszkodzeń w przedziale obciążeń od  $Q_t$  do  $Q_b$ , wyrażony w %/100Tg.

Wskaźnik  $Y$  i  $J$  obliczono z następujących wzorów:

$$Y = \frac{100n_b}{Q_b} \quad (1)$$

$$j = \frac{100(N_b - Q_b)}{Q_b - Q_t} \quad (2)$$

gdzie:

$n_b$  – udział części uszkodzonych w ogólnej liczbie części pierwotnie ułożonych przy obciążeniu  $Q_b$ ,



- $n_t$  – udział części uszkodzonych w ogólnej liczbie części pierwotnie przy obciążeniu  $Q_t$ ,  
 $Q_b$  – obciążenie, dla którego określono parametry niezawodności (przyjęto  $Q_b = 800 \text{ Tg}$ ).

Parametry niezawodności łapek sprężystych dla  $Q_t = 713 \text{ Tg}$  wynosily odpowiednio  $Y = 0,12\%/100\text{Tg}$  oraz  $J = 0,61\%/100\text{Tg}$ . Niezawodność wkładek elektroizolacyjnych cechowała się następującymi parametrami:  $Q_t = 1 \text{ Tg}$ ,  $Y = 1,36\%/100\text{Tg}$  oraz  $J = 1,35\%/100\text{Tg}$ . Przyjęcie wartości  $Q_t = 1 \text{ Tg}$  wynikało z ujawnienia się w początkowym okresie eksploatacji wad produkcyjnych we wkładkach. Analiza zebranych wyników pozwala również stwierdzić, że po obciążeniu 800 Tg niezawodność przekładek podszynowych cechuje się dla przyjętego  $Q_t = 25 \text{ Tg}$  współczynnikami  $Y = 4,2\%/100\text{Tg}$  oraz  $J = 4,31\%/100\text{Tg}$ . Przyjęcie  $Q_t = 25 \text{ Tg}$  było związane z pojawieniem się nadrywów/pęknięć w przekładkach [3].

Uszkodzenia funkcyjne, jak opisano wcześniej są znacznie trudniejsze do zweryfikowania i wymagają przeprowadzenia czasochłonnych badań laboratoryjnych w koordynacji z zarządcą infrastruktury. Wycinek rezultatów odnoszący się do pomiarów sztywności statycznej wstępnych prób laboratoryjnych przeprowadzonych w Instytucie Kolejnictwa w latach 2008-2010 zaprezentowano na rysunkach 6 i 7. Na podstawie analizy wykresów można stwierdzić zależność, w przybliżeniu, liniową pomiędzy czasem eksploatacji a trendem uzyskiwanych wyników sprawdzanych parametrów dla danego typu systemu przytwierdzenia pod warunkiem prawidłowych warunków eksploatacyjnych i wykonywanych okresowych czynności utrzymaniowych. Zmianę sztywności oraz zmiany pozostałych parametrów tj. oporu podłużnego i siły docisku łączą potwierdzone korelacje, co stanowi ułatwienie w obliczeniach parametrów niezawodności. Chwile uszkodzeń systemu przytwierdzenia SB prezentuje się zazwyczaj w okresach rocznych lub półrocznych. Jest to wystarczająca gęstość określania chwil uszkodzeń. Jako rozkład chwil uszkodzeń przyjmuje się rozkład wykładniczy określony funkcją:

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x} \quad \text{dla } 0 \leq x < \infty, \lambda > 0 \quad (3)$$

gdzie:

$\lambda$  – oznacza liczbę uszkodzeń w przedziale czasu  $x$ .

Weryfikację hipotezy o zgodności rozkładu eksperymentalnego z rozkładem wykładniczym można wykonać stosując test zgodności chi-kwadrat w postaci:

$$\chi^2 = \sum_r \frac{(f_i - np_i)^2}{np_i} \quad (4)$$

gdzie:

$f_i$  – empiryczna liczba obserwacji w danym przedziale,

$np_i$  – liczba oczekiwanych obserwacji w danym przedziale,

lub wykonując test Kołmogorowa-Smirnowa, który obok testu chi-kwadrat jest drugim najważniejszym testem badającym zgodność rozkładu empirycznego z rozkładem teoretycznym.

## PODSUMOWANIE

System przytwierdzenia SB składa się z wielu elementów współpracujących ze sobą, przez co należy je interpretować jako generatory uszkodzeń zależnych. Dane historyczne z okręgu doświadczalnego w Szczerbince pokazują, że możliwe jest określenie współczynników niezawodności na podstawie cyklicznych obserwacji stanu elementów. Badania laboratoryjne eksploatacyjnych systemów przytwierdzeń są bardzo pracochłonne, lecz tworzą bardzo wartościową treść dodaną z uwagi na odwzorowanie skrajnego

wariantu obciążeń i możliwości ustawienia wyników badań na osi czasu spośród wyników badań laboratoryjnych przytwierdzeń eksploatacyjnych. W trakcie oceny wizualnej możliwa jest jednoznaczna ocena, czy element jest dobry czy uszkodzony. Przy ocenie uszkodzeń funkcyjnych proces jest znacznie bardziej skomplikowany, ponieważ wymagane jest określenie kryterium oceny oraz odniesienie stanu przytwierdzenia (czas eksploatacji, warunki eksploatacji) do systemów doświadczalnych, których parametry wcześniej oznaczono. Potwierdzono również możliwość odniesienia chwil uszkodzeń do znanych rozkładów statystycznych i określenia prawdopodobieństwa wystąpienia uszkodzeń w przyszłości, co może pozwolić na wykonanie modelu symulacyjnego.

## BIBLIOGRAFIA

1. Antolik Ł., *Przydatność eksploatacyjna przekładek podszynowych a wymagania norm europejskich. Problemy Kolejnictwa*, zeszyt 152, str. 9-19.
2. Dyduch J., Moczarski J. *Podstawy eksploatacji systemów sterowania ruchem kolejowym*, Wydawnictwo Politechniki Radomskiej, Radom 2007
3. Filipowicz Szwarz J. *Wyniki poligonowych badań przytwierdzeń sprężystych SB3 (tłum. A. Oczykowski), Drogi Kolejowe 1991*
4. Ślaskowski A. i inni. *Zastosowanie metody elementów skończonych do obliczeń wytrzymałościowych mocowania typu SB3. XXII KONFERENCJA NAUKOWA POJAZDY SZYNOWE 2016* Bydgoszcz – Gniew.
5. Towpik K. *Linie kolejowe dużych prędkości. Problemy Kolejnictwa nr 151*, Instytut Kolejnictwa, Warszawa 2011, s. 28-70
6. *Warunki Techniczne Wykonania i Odbioru łapek sprężystych i sprężyn przytwierdzających szyny do podkładów i podrozdzielnic nr WTWIO - ILK3d-5183-5/2007E.P.*
7. PN-EN 13146-9+A1:2012 Kolejnictwo -- Tor -- Metody badań systemów przytwierdzeń -- Część 9: Określenie sztywności
8. PN-EN 13481-2:2012 Kolejnictwo -- Tor -- Wymagania eksploatacyjne systemów przytwierdzeń -- Część 2: Systemy przytwierdzeń do podkładów betonowych
9. PN-EN 13146-9+A1:2015-01 Kolejnictwo -- Tor -- Metody badań systemów przytwierdzeń -- Część 4: Skutki obciążeń powtarzalnych

## RESEARCHES OF THE RELIABILITY OF THE FASTENING SYSTEMS

### Abstract

*This article discusses the sources of the damages and describes the characteristics of the SB fastening system. The article also presents an introduction to the evaluation of the reliability of fastening system, based on the example of laboratory and polygonal tests.*

Autorzy:

Prof. dr hab. inż. **Janusz Dyduch** – Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny w Radomiu, Wydział Transportu i Elektrotechniki  
 mgr inż. **Łukasz Antolik** – Instytut Kolejnictwa, Laboratorium Badań Materiałów i Elementów Konstrukcji.