

Kazimierz Towpik

# Możliwości oceny naprężeń w szynach toru bezстыkowego

*W artykule przedstawiono stosowane w diagnostyce toru bezстыkowego określenia odnoszące się do temperatury szyn, zwłaszcza temperatury neutralnej, przyczyny zmian jej wartości podczas eksploatacji, związek z naprężeniami i siłami podłużnymi obciążającymi tor bezстыkowy, jak również zjawisko wybożenia oraz możliwości oceny bezpieczeństwa eksploatowanego toru bezстыkowego. Omówiono stosowane obecnie metody pomiaru naprężeń i możliwości wykorzystania pomiarów ultradźwiękowych.*

## Naprężenia i ich związek z bezpieczeństwem toru bezстыkowego

Problem oceny wielkości i rozkładu naprężeń w szynach toru bezстыkowego jest od dziesięcioleci przedmiotem zainteresowania służb kolejowych odpowiedzialnych za utrzymanie nawierzchni, jak również pracowników nauki zainteresowanych złożonością zjawisk występujących w eksploatowanym torze bezстыkowym i często zagrażających bezpieczeństwu jego eksploatacji. Od dłuższego już czasu dąży się do opracowania dających się zastosować w praktyce sposobów oceny naprężeń pojawiających się w szynach toru bezстыkowego. Znajomość stanu naprężeń umożliwia bowiem przewidywanie sytuacji zagrażających bezpieczeństwu ruchu i podejmowanie trafnych decyzji dotyczących procesu utrzymania nawierzchni. Ocena bezpieczeństwa w przypadku toru bezстыkowego wiąże się więc przede wszystkim z identyfikacją stanu naprężeń lub też odpowiadających im sił podłużnych obliczanych dla stałego przekroju poprzecznego szyny. Wielkości naprężeń termicznych zależą od zmian temperatury szyn, stąd też korzysta się z wielu pojęć określających temperaturę szyny. Należą do nich [7]:

- średnia temperatura szyny  $\bar{T}_m$ , będąca średnią arytmetyczną wartości maksymalnej i minimalnej temperatury szyny mogącej wystąpić w danych warunkach klimatycznych;
- temperatura nominalna najkorzystniejsza z punktu widzenia przytwierdzenia szyn do podkładów o wartości większej od temperatury średniej o 1 do 10°C;
- temperatura przytwierdzenia szyny  $T_p$  jaką mają szyny w momencie ich przytwierdzenia;
- temperatura neutralna  $T_N$ , przy której w szynie nie występują naprężenia.

Temperaturę neutralną  $T_N$  można wyznaczyć z następującego równania:

$$F = A E \alpha (T_{szyn} - T_N) \quad [\text{kN}]$$

gdzie:

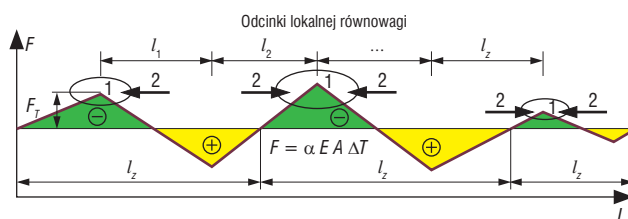
- $F$  – siła podłużna w szynie [kN],
- $A$  – przekrój poprzeczny szyny [mm],
- $\alpha$  – współczynnik rozszerzalności cieplnej stali szynowej [1/°C],
- $T_{szyn}$  – temperatura szyny w chwili pomiaru [°C].

Zmianę temperatury neutralnej szyny można obliczyć z wyrażenia:

$$\Delta T_N = T_{szyn} + \frac{F}{AE\alpha} \quad [^\circ\text{C}]$$

gdzie:

$AE\alpha = 18,6 \text{ kN}$  dla szyny 60 E1.



Rys. 1. Nierównomierny rozkład sił podłużnych z miejscami ich koncentracji (1); często są to miejsca uniemożliwiające przemieszczenia szyn (np. przejazd, most)  $L$  – strefa centralna toru bezстыkowego,  $l_{1,2,\dots,z}$  – odcinki na których wystąpiło pełzanie szyn

W celu obliczenia temperatury neutralnej konieczny jest więc równoczesny pomiar aktualnej temperatury szyny oraz działającej w niej siły podłużnej.

Należy również pamiętać, że oprócz naprężeń termicznych w szynach toru bezстыkowego mogą dodatkowo pojawiać się naprężenia:

- wskutek pełzania toków szynowych (podłużnych przemieszczeń samych szyn lub szyn wraz z podkładami);
- własne (powstające w procesie produkcji szyn, ich transportu, wyładunku i ułożenia w torze);
- wskutek oddziaływań eksploatacyjnych (zginania pod obciążeniem pojazdem szynowym oraz hamowania i rozruchu pojazdów trakcyjnych).

Siły hamowania i rozruchu przekazywane wzdłuż toru mogą wynieść 20–30 kN/m. Pionowe przemieszczenia szyn są wynikiem występujących losowo różnic w osiadaniu podsypki oraz niejednorodności konstrukcyjnej nawierzchni. Ruchy poprzeczne toru położonego w łukach o małych promieniach oraz wspomniane przemieszczenia pionowe, będące wynikiem zróżnicowania charakterystyk dynamicznych toru, mogą być powodem zmienności naprężeń w szynach wzdłuż toru. Zmianę naprężeń może również wywołać hamowanie prądami wirowymi. Wielkość nierównomiernego ogrzania szyn (głównie strefy główki) zależy od liczby przejazdów oraz czasu hamowania.

W eksploatacji obserwuje się często miejscowe występujące pełzanie toru spowodowane przez różnice w zagęszczeniu podsypki, niejednorodności docisk stopki szyny w przytwierdzeniu, oddziaływanie sił trakcyjnych (hamowanie i rozruch pojazdów), jak również różnice w nagraniu szyn na długości toru. Pełzanie o wartości  $\delta$ , spowoduje przyrost siły podłużnej w szynach, nato-

miast na części sąsiedniej zmniejszenie tej siły. Oznacza to zmianę temperatury neutralnej o wartość (rys. 1):

$$\Delta T_N = \frac{\delta}{500\alpha \cdot l_z} \text{ [}^\circ\text{C]}$$

gdzie:

$l_z$  – długość odcinka toru na którym stwierdzono pełzanie [m].

Czynnikiem zakłócającym równomierny rozkład oporu podłużnego toru, a co za tym idzie również rozkład naprężeń (sił), jest występowanie w torze stref niejednorodnych konstrukcyjnie w postaci przejazdów, dojazdów do mostów, miejscowej zmiany typu podkładów, jak również rozjazdów zespawanych z torem bezстыkowym. Praktyka eksploatacyjna wskazuje, że są to miejsca, gdzie najczęściej dochodzi do kumulowania się sił podłużnych, spowodowanego zwiększonymi oporami podłużnymi konstrukcji (zwiększona sztywność podłużna i poprzeczna). W niesprzyjających warunkach, a zwłaszcza przy złym utrzymaniu i braku kontroli stanu nawierzchni, strefy toru bezстыkowego przyległe do tych miejsc mogą ulegać odkształceniom prowadzącym nawet do wyboczeń toru [2].



Rys. 2. Odkształcenie toru poprzedzające wyboczenie – skutek złego utrzymania toru

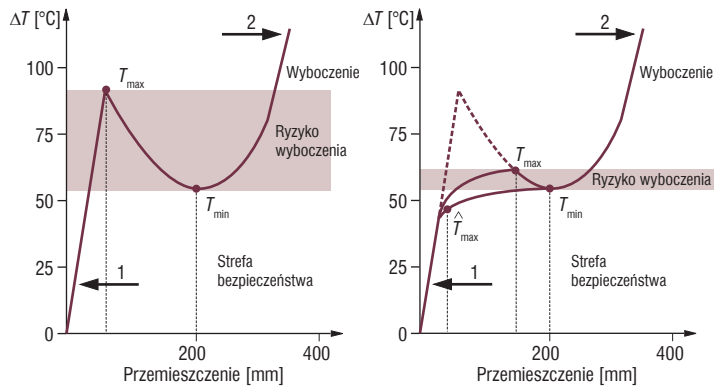
Wyboczenie następuje wówczas, gdy siły działające w szynach pokonują opór podsypki oraz sztywność ramy toru. Zazwyczaj poprzedzone jest ono pojawieniem się odkształceń toków szynowych. Wartość sumy sił podłużnych działających w obu szynach toru bezстыkowego, przy której może nastąpić wyboczenie określamy jako siłę krytyczną.

Zjawiska obserwowane w czasie eksploatacji poza odcinkami „oddychającymi”, w strefie centralnej toru bezстыkowego to przede wszystkim przemieszczenia podłużne (pełzanie) szyn oraz miejscowe poziome i pionowe odkształcenia toru, narastające z upływem czasu. Zjawiska te o charakterze reologicznym mogą doprowadzić do zmniejszenia, a nawet utraty stateczności przez tor bezстыkowy. Rozróżnia się odkształcenie miejscowe toru, charakteryzujące się falami odkształcenia o długości 4–8 m i amplitudach 20–80 mm, przy których szyny pozostają najczęściej jeszcze w stanie naprężonym, a cały tor może znajdować się na granicy utraty stateczności. Wyboczenie następuje w wyniku wyzwolenia się naprężeń i jest połączone z pokonaniem oporu podsypki oraz sztywności ramowej toru wskutek czego fala od-

kształcenia osiąga długość 8–20 m, z amplitudą około jednego metra.

Postępując się prostym modelem toru interpretuje się jego stateczność wprowadzając pojęcie minimalnego  $T_{\min}$  i maksymalnego przyrostu temperatury szyn  $T_{\max}$  w stosunku do temperatury neutralnej  $T_N$ .

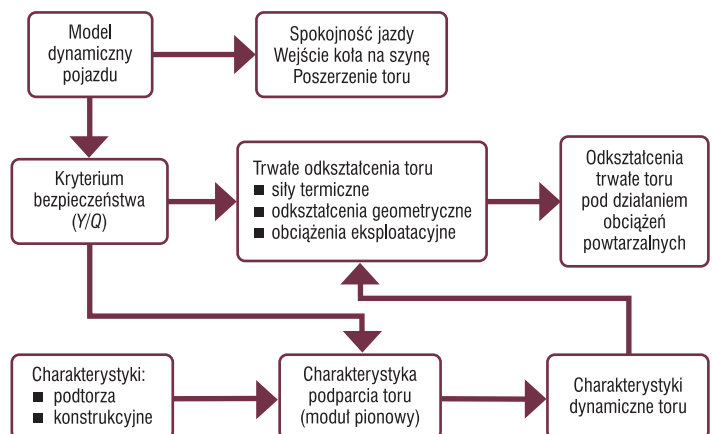
Minimalny i maksymalny przyrost temperatury wyznacza obszary przejścia toru bezстыkowego z położenia równowagi do równowagi chwiejnej lub do stanu utraty stateczności (rys. 3).



Rys. 3. Ocena stateczności toru bezстыkowego – krzywe ograniczające 1 – odkształcenie sprężyste toru, 2 – odkształcenie trwałe toru (rysunek sporządzony dla toru bezстыkowego z szynami 60E1, podkładami betonowymi, dla odkształcenia o długości fali 8 m i strzałce nierówności 12 mm)

Programy komputerowe opracowane w latach 90, XX w. przez AAR-TTC1 (Associations of American Railroads-Transportation Technology Center – program CWR – buckle) oraz przez TU – Delft (program CWERRI) umożliwiają analizowanie stateczności toru bezстыkowego i wprowadzają pojęcie dopuszczalnego przyrostu temperatury  $T_{dop}$ , z rozróżnieniem dwóch poziomów bezpieczeństwa – pierwszego, dla którego  $T_{dop} = T_{\min}$  oraz drugiego, gdy  $T_{dop} = T_{\min} + \Delta$ . Wybór wartości wymaga wnikliwej oceny warunków stateczności, ponieważ ze wzrostem temperatury  $T_{\min}$  zwiększa się szybko energia potencjalna wybożenia.

W przypadku linii dużych prędkości do oceny stateczności toru podchodzi się odmiennie, przyjmując jako kryterium dopuszczalne odkształcenie poziome toru. Jego przekroczenie oznacza, że prowadzenie ruchu z dużymi prędkościami przestaje być w pełni bezpieczne. Podejście takie ilustruje rysunek (rys. 4).



Rys. 4. Ocena bezpieczeństwa w przypadku torów do dużych prędkości (kryterium granicznej nierówności)

W propozycji modelowania warunków poprzecznego odkształcenia toru programem TREDa (*Track Residual Deflection Analysis*) uwzględniane są zarówno warunki wynikające z ilorazu sił  $Y$  i  $Q$ , jak również z kryterium Prud'homme'a [6].

## Możliwości pomiaru sił i naprężeń w szynach toru bezстыkowego

Stan obecnych badań wskazuje, że nie opracowano dotychczas metody umożliwiającej bezpośredni pomiar rzeczywistych naprężeń lub sił podłużnych w szynach eksploatowanego toru. Stosowana w diagnostyce nawierzchni metoda „punktów stałych” wymaga pomiaru temperatury szyn i określania różnicy temperatur między stanem zerowym i stanem ocenianym. Jest pracochłonna i mało dokładna ze względu na trudności odtwarzania przekrojów kontrolnych i błędy pomiaru położenia punktów stałych względem przekroju.

Do stosowanych od wielu lat sposobów oceny sił podłużnych należą pomiary za pomocą ekstensometrów mechaniczno-optycznych. Jednym z przyrządów, umożliwiających pomiar siły podłużnej w szynie, jest przyrząd MS-02 [4]. Miernik, dzięki cechom materiałowym i konstrukcyjnym, charakteryzuje taki sam współczynnik rozszerzalności cieplnej co szynę. Podobnie prędkość absorpcji energii cieplnej przyrządu zbliżona jest do absorpcji cieplnej szyny.

Przyrząd rejestruje wydłużenie lub skrócenie bazy pomiarowej, wywołane zmianą temperatury szyny oraz zewnętrznymi obciążeniami eksploatacyjnymi, przykładany jest do trzpieni zamocowanych w osi obojętnej szyny (rys. 5).



Rys. 5. Przyrząd MS-02 do pomiaru sił podłużnych w szynach toru bezстыkowego

W opisany sposób można dokonywać pomiaru i rejestrować zmiany sił podłużnych w szynach względem pomiaru odniesienia. W przypadku, gdy pomiaru odniesienia dokonano podczas układania toru dla szyn pozbawionych naprężeń termicznych, w późniejszych pomiarach rejestruje się bezwzględne wartości sił występujących w szynach. Jeżeli natomiast montaż baz pomiarowych dokonywany jest w torze już eksploatowanym, kolejne pomiary wskazują jedynie wartości przyrostów sił w określonych przekrojach na długości toru bezстыkowego. W przypadku umieszczenia baz pomiarowych w nowych szynach bezстыkowych i rejestracji początkowego stanu naprężeń po ułożeniu szyn, ten sposób pomiaru może więc być wykorzystany w diagnostyce toru bezстыkowego.

W ostatnim okresie zanotowano postęp badań wskazujący na możliwości zastosowania do oceny naprężeń metod ultradźwiękowych i magnetycznych [5].

Metodą pomiarową (system DEBRO), która znalazła zastosowanie do oceny zmienności naprężeń w eksploatowanym torze bezстыkowym, jest metoda ultradźwiękowa wykorzystująca efekt

elastoakustyczny tzn. zależność prędkości przemieszczania się fali ultradźwiękowej od naprężeń. Prędkość fali uzależniona jest od istniejących w szynie naprężeń, lecz również od takich czynników, jak: temperatura szyny, gęstości masy materiału oraz stałe elastoakustyczne [1, 3].

Miernik pokazany na rysunku 6 umożliwia szybki pomiar w określonych miejscach na powierzchni bocznej szyny.



Rys. 6. Ultradźwiękowy miernik naprężeń przypowierzchniowych (system DEBRO)

Pomiary tym miernikiem wykonywane w eksploatowanym torze bezстыkowym umożliwiły stwierdzenie, że w niektórych miejscach toru rejestrowane są wartości naprężeń różniące się istotnie od wartości wynikających z teoretycznych zależności naprężenia termicznego od temperatury szyny (stwierdzono np. zależność liniową wynoszącą  $1,9 \text{ MPa}/1^\circ\text{C}$ , co odbiega wyraźnie od teoretycznej wartości  $2,5 \text{ MPa}/1^\circ\text{C}$ ).

Stosując pomiar miernikiem ultradźwiękowym można było również określić zmiany naprężeń w szynach występujące w czasie wymiany nawierzchni w stosunku do naprężeń istniejących w szynach wolnoleżących, przed ich przytwierdzeniem do podkładów (rys. 7).

Duża zmienność naprężeń w szynach bezстыkowych stwierdzona podczas wykonywania naprawy nawierzchni oraz w pierwszym okresie eksploatacji wskazuje, że obok naprężeń cieplnych istotne znaczenie mogą mieć naprężenia własne, powstające w szynach w wyniku procesu produkcji oraz transportu, wyładunku i układania szyn w torze.

Wspomniane pomiary ultradźwiękowe znajdują zastosowanie w badaniach rozkładów i wielkości naprężeń w szynach i dotychczas nie są wykorzystywane do rutynowej diagnostyki toru bezстыkowego.

Przyrządy do ciągłego monitorowania wielkości sił podłużnych, temperatury szyny oraz zmian wartości temperatury neutralnej (*Rail Stress Module*) zastosowały w praktyce koleje amerykańskie. Montowane na szynach umożliwiają rejestrację wymienionych wielkości, sygnalizują fakt pęknięcia szyny oraz podają wskaźnik charakteryzujący stopień zagrożenia wybozczeniem toru. Informacje przekazywane są drogą radiową i gromadzone w bazach danych. Mogą być również przekazywane obsłudze pociągu oraz wykorzystane przez służbę zabezpieczenia ruchu.

**Podsumowanie**

Zasadniczą trudność prawidłowej oceny rzeczywistych rozkładów naprężeń w szynach toru bezstykowego wynika z niedoskonałości stosowanych obecnie metod pomiaru naprężeń.

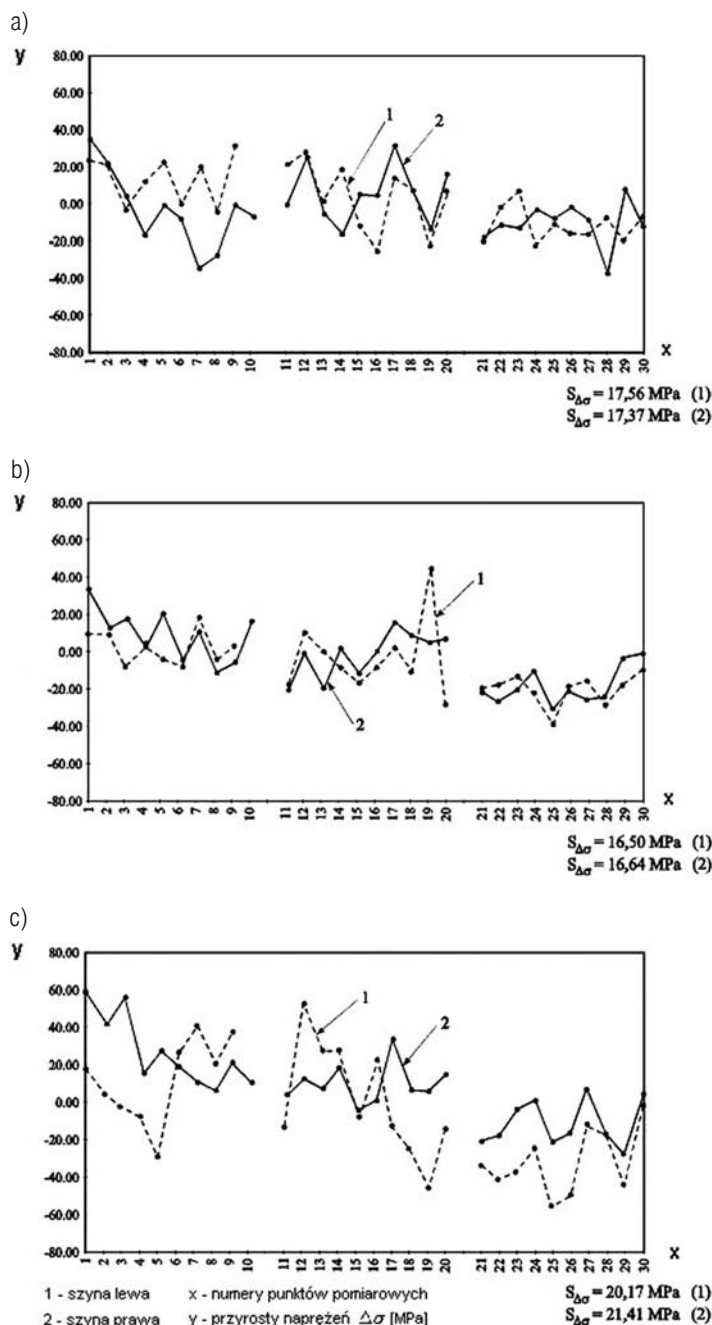
Nie udało się dotychczas opracować metody umożliwiającej pomiar wielkości i zmian naprężeń bez znajomości ich początkowego stanu.

Z licznych prób zastosowania do pomiaru naprężeń różnych metod, wykorzystujących na przykład zmiany własności magnetycznych i magnetoelastycznych szyny (Railscan, Railtest), jak również metod ultradźwiękowych, te ostatnie wydają się być najbardziej przydatne. Opracowanie przydatnej w praktyce metody pomiaru naprężeń w szynach toru bezstykowego i jej wykorzystanie w diagnostyce nawierzchni jest w dalszym ciągu sprawą otwartą.



**Literatura**

- [1] Adamski M.: *Naprężenia własne. Przykłady pomiarów ultradźwiękowych*. Biuro Gamma, Warszawa, 1999.
- [2] Czyczula W., Massel A., Sołkowski J., Towpik K.: *Empirical investigation of longitudinal creep and breathing of tight curves*. Interim Report PKP/Tu Kraków for ERRI D 202 Committee, Utrecht 1996.
- [3] Deputat J., Szelażek J., Adamski M.: *Experiences in ultrasonic measurements of stress in rail*. International Conference of Rail Quality and Maintenance, Delft 1992.
- [4] Jamka M.: *Nowa metoda pomiaru sił podłużnych w szynach toru bezstykowego*. Zeszyty Naukowo-Techniczne Oddziału SITKom w Krakowie, zeszyt 21, 1992.
- [5] Koc W.: *Przegląd prac badawczych nad określeniem sił podłużnych w szynach toru bezstykowego*. Materiały IV Seminarium Diagnostyki Nawierzchni Szynowych, Gdańsk 2002.
- [6] Towpik K.: *Infrastruktura drogi kolejowej. Obciążenia i trwałość nawierzchni*. Biblioteka Problemów Eksploatacji, Warszawa – Radom 2006.
- [7] *UIC Leaflet 720-R. Laying and maintenance of CWR track*. Paris 2000.



Rys. 7. Zmiany naprężeń w szynach bezstykowych podczas wymiany nawierzchni oraz po jej zakończeniu  
 a – po przytwierdzeniu szyn do podkładów, b – po regulacji położenia toru i podbiciu, c – po zakończeniu robót wymiany nawierzchni

prof. dr hab. inż. Kazimierz Towpik  
 Politechnika Warszawska  
 kto@it.pw.edu.pl

**XIX Konferencja Naukowa Pojazdy szynowe  
 15–17 września 2010 r.**

Celem konferencji jest przedstawienie wyników najnowszych badań teoretycznych i eksploatacyjnych w takich dziedzinach, jak: zagadnienia dynamiki pojazdów ■ konstrukcja, wytwarzanie i modernizacja pojazdów ■ eksploatacja i niezawodność pojazdów ■ badania i diagnostyka pojazdów szynowych ■ zagadnienia trakcyjne i sterowanie pojazdami ■ logistyka i organizacja transportu ■ efektywność transportu szynowego ■ inżynieria i infrastruktura transportu szynowego ■ bezpieczeństwo w transporcie ■ koleje dużych prędkości

Informacje: Politechnika Krakowska, Instytut Pojazdów Szynowych  
 ul. Jana Pawła II 37, 31-864 Kraków, Konferencja POJAZDY SZYNOWE  
 tel. +48 12 374 33 10, fax +48 12 374 33 11