

MOŻLIWOŚCI OCENY STANU NAPRĘŻEŃ W SZYNACH TORU BEZSTYKOWEGO¹

Kazimierz TOWPIK

Międzynarodowa Wyższa Szkoła Logistyki i Transportu we Wrocławiu

W referacie scharakteryzowano złożony stan naprężeń (sił podłużnych) w szynach eksploatowanego toru bezstykowego. Głównym źródłem naprężeń są zmiany temperatury szyn, współdziałanie pojazdu z torem oraz naprężenia własne będące efektem procesu produkcji. Znajomość rozkładu naprężeń w szynach ma istotne znaczenie dla oceny bezpieczeństwa eksploatowanego toru bezstykowego oraz zrozumienia rozwoju defektów szyn. Omówiono również metody pomiaru naprężeń (sił podłużnych) w szynach.

Słowa kluczowe: tor bezstykowy, defekty szyn, pomiary naprężeń.

1. WSTĘP

Ocena bezpieczeństwa w przypadku toru bezstykowego wymaga przede wszystkim identyfikacji stanu naprężeń lub też odpowiadających im sił podłużnych obliczanych dla stałego przekroju poprzecznego szyny. Znajomość stanu naprężeń umożliwia bowiem przewidywanie sytuacji zagrażających bezpieczeństwu ruchu i podejmowanie trafnych decyzji dotyczących procesu utrzymania nawierzchni. W niekorzystnych warunkach, zwłaszcza przy złym utrzymaniu, tor bezstykowy może ulec odkształceniu, a nawet wyboczeniu pod wpływem wysokich temperatur. W temperaturach niskich wskutek działania dużych sił rozciągających może dochodzić do pękania i złamań szyn.

Drugi powód zainteresowania stanem naprężeń w szynach to możliwość oceny ich wpływu na powstawanie i rozwój defektów szyn, zarówno o charakterze zmęczeniowym, jak i wad wewnętrznych.

Od wielu lat dąży się do opracowania dających się zastosować w praktyce sposobów oceny naprężeń w szynach toru bezstykowego. W strefie nieruchomej toru bezstykowego pojawiają się naprężenia ściskające lub rozciągające, których wartość zależy od różnicy pomiędzy temperaturą szyny w danej chwili a tak zwaną *temperaturą neutralną* T_N , przy której w szynie nie występują naprężenia termiczne. Jednym z podstawowych parametrów występujących w analizach stanu toru bezstykowego jest więc wartość naprężeń termicznych. Jednak oprócz naprężeń termicznych w szynach dodatkowo występują:

¹ DOI 10.21008/j.1897-4007.2017.25.31

- naprężenia wskutek pełzania toków szynowych (podłużnych przemieszczeń samych szyn lub szyn wraz z podkładami);
- naprężenia własne (powstające w szynach podczas ich produkcji, transportu, wyładunku i ułożenia szyn w torze);
- naprężenia będące wynikiem oddziaływań eksploatacyjnych – zginania się szyn pod obciążeniem pojazdami oraz oddziaływania dodatkowych sił podłużnych pochodzących od hamowania i rozruchu lokomotyw.

Wszystko to sprawia, że wielkość i rozkład naprężeń w szynach toru bezстыkowego jest złożony i nierównomierny na długości toru.

Skutki wielkości i rozkładu naprężeń w szynach toru bezстыkowego można oceniać z punktu widzenia bezpieczeństwa eksploatacji nawierzchni kolejowej, jak również ze względu na ich wpływ na powstawanie i rozwój defektów szyn.

2. BADANIA ZMIENNOŚCI NAPRĘŻEŃ W EKSPLOATOWANYCH SZYNACH TORU BEZSTYKOWEGO

2.1. Naprężenia termiczne

Ocena wartości naprężeń termicznych (lub odpowiadającym im sił podłużnych działających w stałym przekroju szyny) umożliwia lokalizację w torze tych miejsc, w których wskutek niekorzystnych okoliczności może wystąpić zagrożenie. Miarą zmian wartości sił podłużnych (naprężeń) w szynach toru bezстыkowego występujących na długości toru może być zmiana wartości neutralnej temperatury szyn T_N , obliczana z wyrażenia:

$$\Delta T_N = T_{szyn} + \frac{F}{AE\alpha} \text{ [}^\circ\text{C]}, \quad (1)$$

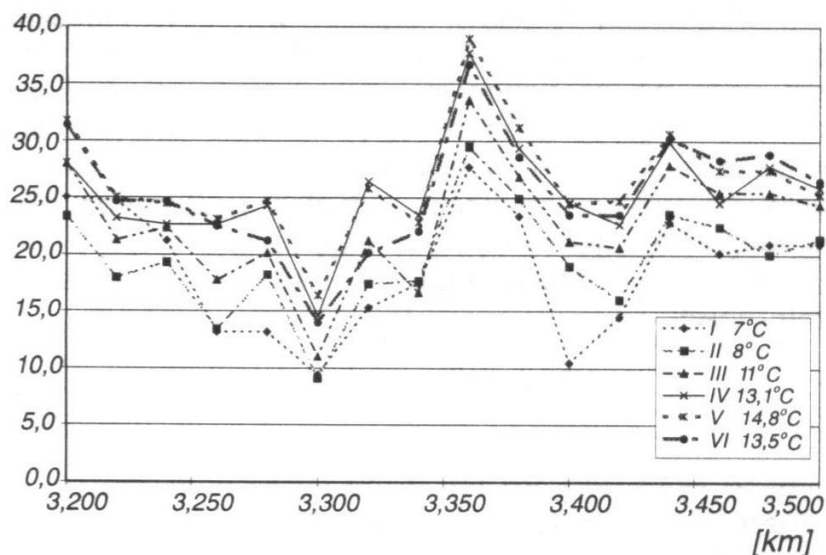
gdzie:

T_{szyn} – temperatura szyny w chwili pomiaru siły podłużnej F ,

$AE\alpha$ – iloczyn wartości stałych i przekroju poprzecznego szyny danego typu.

Przykład zmian wartości temperatury neutralnej na długości 300 m toru w czasie jednej doby przy różnych temperaturach szyny pokazany na rysunku 1 świadczy o znacznym zróżnicowaniu rozkładu naprężeń wzdłuż toru [2].

Wyniki badań [4, 7] świadczą również, że w niektórych miejscach toru rejestruje się wartości naprężeń różniące się istotnie od wartości wynikających z teoretycznych zależności naprężenia termicznego od temperatury szyny (stwierdzono zależność liniową wynoszącą 1,9 MPa/1°C, co odbiega wyraźnie od teoretycznej wartości 2,5 MPa/1°C). Znaczne przyrosty naprężeń ściskających i rozciągających, często rzędu kilkudziesięciu MPa, w niekorzystnym przypadku sumowania się naprężeń termicznych (osiągających w skrajnych przypadkach wartości do 100 MPa) z naprężeniami eksploatacyjnymi i naprężeniami własnymi szyn mogą zagrazić bezpiecznej pracy toru bezстыkowego.



Rys. 1. Zmiany wartości temperatury neutralnej szyny wzdłuż toru w czasie jednej doby (pomiar sił termicznych miernikiem MS)

2.2. Naprężenia własne szyny

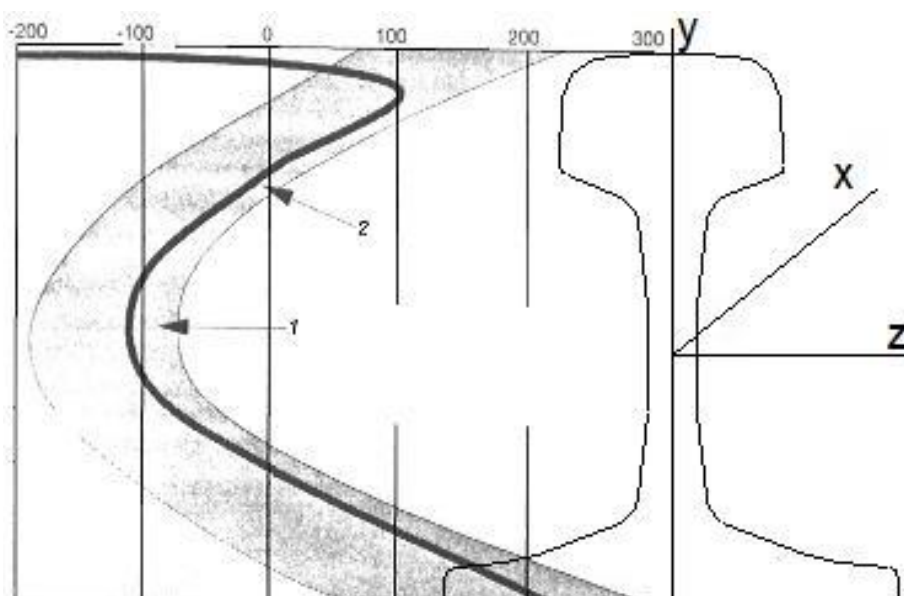
Naprężenia własne występujące w szynie rozumiane są jako naprężenia równoważące się wewnątrz elementu, na który nie oddziałuje żadne obciążenie zewnętrzne. Naprężenia własne są więc miarą energii sprężystej zgromadzonej w określonym obszarze ciała i stanowią dodatkowe obciążenie elementu. Powstają w efekcie pojawienia się w materiale niejednorodnych odkształceń plastycznych i mogą osiągnąć na dolnej powierzchni stopki szyny połowę granicy wytrzymałości na rozciąganie. Mają istotne znaczenie dla zachowania własności eksploatacyjnych, a zwłaszcza odporności szyn na pęknięcie. Mogą też doprowadzić do uszkodzeń szyn, zanim przekroczona będzie ich wytrzymałość zmęczeniowa. Źródłem naprężeń własnych może być zarówno proces produkcyjny (np. wielokrotne przeginanie na rolkach podczas prostowania szyn), jak i zgniot na zimno powierzchni tocznej szyn w eksploatacji, wskutek czego składowa podłużna naprężeń może przyspieszyć pęknięcie szyn wzdłuż szyjki. Znaczenie naprężeń własnych wynika również z tego, że nakładając się na naprężenia wywołane obciążeniem zewnętrznym, powodują pozorne przesunięcie granicy plastyczności i zmianę własności wytrzymałościowych materiału. Obecność naprężeń własnych może być zarówno korzystna, jak i niekorzystna, powodując przyspieszenie rozwoju defektów oraz utratę stabilności wymiarowej i kształtu szyny.

Znaczenie naprężeń własnych szyn dla rozkładu sił podłużnych w eksploatowanym torze bezстыkowym wymaga dalszych badań.

2.3. Zmiany naprężeń w eksploatowanych szynach i ich wpływ na powstawanie defektów szyn

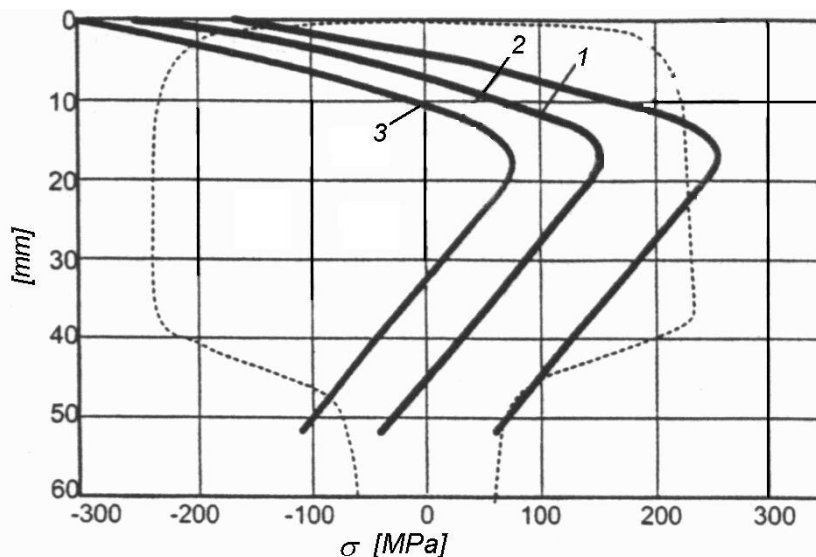
Badania uszkodzeń i rozwoju defektów w szynach kolejowych i elementach rozjazdów wskazują na potrzebę rozpoznania rzeczywistego stanu naprężeń, zarówno pochodzących od obciążeń zewnętrznych, jak również naprężeń własnych. Naprężenia te mogą przyspieszać lub spowalniać rozwój defektów.

Po ułożeniu nowych szyn w torze, wskutek obciążeń eksploatacyjnych następuje zmiana naprężeń w główce szyny z rozciągających na ściskające. Tego rodzaju zmianę rozkładu naprężeń wzdłużnych w główce szyny pokazano na rysunku 2.



Rys. 2. Rozkład naprężeń własnych w szynie eksploatowanej (1) oraz nowej szynie przed ułożeniem w torze (2) (według [5])

Wskutek eksploatacji rozkłady naprężeń wzdłużnych stanowiące wypadkową naprężeń własnych, naprężeń termicznych oraz naprężeń wywołanych oddziaływaniami dynamicznymi od kół pojazdów ulegają zmianie uzależnionej od stanu konstrukcji nawierzchni oraz temperatury szyn. Na rysunku 3 pokazano rozkłady naprężeń wzdłużnych w główce szyny po przeniesieniu przez tor obciążenia 60 Tg przy różnych temperaturach szyny.



Rys. 3. Rozkłady naprężeń wzdłużnych w główce szyny po przeniesieniu obciążenia 60 Tg (szyna 60E1, $R_m=1100$ MPa) [5] 1, 2, 3 – przy temperaturze szyny odpowiednio 16°C, 20°C, 52°C

Na głębokości ok. 7 mm od powierzchni toczonej szyny naprężenia przechodzą w naprężenia rozciągające, które osiągają swoje maksimum na głębokości ok. 17 mm, a następnie w dalszej części główki zmieniają znak na ujemny. W lecie naprężenia sumują się z ściskającymi naprężeniami termicznymi, w zimie z rozciągającymi oraz ze zmiennymi naprężeniami od dynamicznych obciążeń. Strefa naprężeń rozciągających przy temperaturze 20°C występuje na głębokości 10 ÷ 32 mm, a w zimie rozciąga się od 3,5 mm pod powierzchnią toczną, sięgając aż do szyjki.

W czasie współdziałania koła z szyną na powierzchni kontaktu występują naprężenia normalne i styczne (wzdłużne i poprzeczne), których rozkład zależy od wielkości kontaktu i stanu powierzchni oraz wartości poślizgów. Naprężenia te wraz z naprężeniami powstającymi wskutek zginania szyny oraz naprężeniami własnymi mogą doprowadzić do przekroczenia granicy plastyczności materiału szynowego w warstwie znajdującej się poniżej powierzchni toczonej. Zachodzi tam początkowo umocnienie, a następnie w eksploatacji zmęczenie materiału prowadzące do nadpęknięć. Jednocześnie wskutek działania naprężeń stycznych następuje płynięcie materiału w kierunku zgodnym z ruchem koła, a także poprzeczne w stronę nieobciążonej krawędzi szyny. Zgniot materiału w strefie kontaktu powoduje zmianę naprężeń własnych w warstwie przypowierzchniowej główki z rozciągających (w nowych szynach) na ściskające. Oddziałuje to korzystnie na wytrzymałość zmęczeniową szyny. O ile naprężenia ściskające są korzystne z punktu widzenia trwałości materiału (zapobiegają powstawaniu mikropęknięć), o tyle naprężenia rozciągające nie przynoszą korzyści, a wręcz wpływają na osłabienie szy-

ny. Niebezpieczny jest przyrost naprężeń w obszarach najbardziej obciążonych w eksploatacji, tj. w obszarze główki szyny. Znaczny wzrost naprężeń rozciągających może prowadzić do powstania sytuacji niebezpiecznych, gdy naprężenia własne rozciągające nałożą się z naprężeniami pochodzącymi od zewnętrznych obciążeń dynamicznych, powodując osłabienie wytrzymałości mechanicznej elementu. Może to przyspieszać powstawanie pęknięć, prowadząc do zagrożenia bezpieczeństwa ruchu [6, 8].

Norma europejska podaje jako wartość dopuszczalną 250 MPa dla naprężeń wzdłużnych w główce i stopce szyny. Zaleca się jednak zmniejszenie tych naprężeń do wartości nieprzekraczającej 125 MPa. Krytyczne wartości głębokości pęknięć zależą od temperatury szyny – najmniejsze są w zimie. Dzięki ograniczeniu naprężeń własnych do 100 MPa krytyczna głębokość pęknięcia przy temperaturze -20°C zwiększa się o ok. 170%, a przy 50 MPa o 300%, co sprawia, że niewielkie mechaniczne uszkodzenia górnej powierzchni szyny lub wady korozyjne nie stanowią już zagrożenia. Znaczne naprężenia termiczne występujące w zimie zwiększają prędkość rozwoju pęknięć, lecz jednocześnie zmniejszają krytyczną głębokość pęknięcia.

W przypadku równoczesnego wystąpienia podłużnych naprężeń własnych o wartości 240 MPa oraz działania rozciągających naprężeń termicznych rzędu 100 MPa, jak również eksploatacyjnych naprężeń zginających o wartości 100 MPa może nastąpić pęknięcie szyny, jeśli w szynie istnieje pęknięcie o głębokości 2 mm.

3. MOŻLIWOŚCI POMIARU NAPRĘŻEŃ W SZYNACH EKSPLOATOWANEGO TORU BEZSTYKOWEGO

Metodą określania naprężeń w szynach stosowaną rutynowo w diagnostyce toru bezstykowego jest pomiar przemieszczeń ustalonych punktów na szynie w stosunku do stałego punktu (przekroju) kontrolnego i sprowadza się do oceny wielkości pełzania szyn przy założeniu proporcjonalności naprężeń do odkształceń wynikającej z prawa Hooke'a:

$$\Delta\sigma = E \frac{\Delta l}{l}, \quad (2)$$

gdzie:

$\Delta\sigma$ – zmiana wartości naprężenia,

E – moduł Younga,

l – początkowa odległość między punktami na szynie,

Δl – zmiana odległości między punktami.

Siłę podłużną wywołaną pełzaniem szyn można obliczyć wówczas ze wzoru:

$$F_t = (n_2 - n_1) \frac{EA}{l}, \quad (3)$$

gdzie:

n_1, n_2 – wartości przesunięć punktów oznaczonych na szynie w stosunku do kontrolnych punktów stałych w dwóch sąsiednich przekrojach.

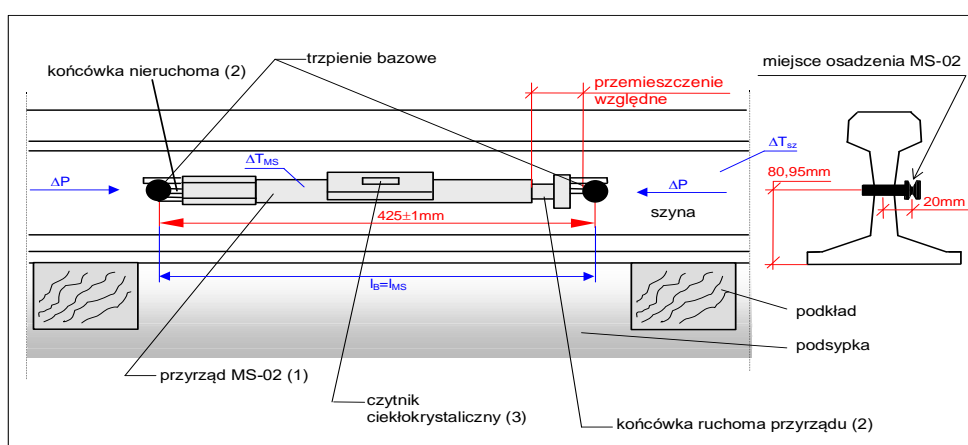
Punkty stałe oznacza się po obu stronach toru na słupach trakcyjnych, mostach i innych obiektach inżynieryjnych lub znakach regulacji osi toru, uzyskując przekrój kontrolny poprzez napięcie między punktami linki pomiarowej. Podczas pierwszego (zerowego) pomiaru na zewnętrznej powierzchni główki szyny utrwała się punkty kontrolne, których położenie odpowiada zerowym przemieszczeniom. Kolejne pomiary przesunięcia punktów kontrolnych względem przekroju kontrolnego umożliwiają określenie wielkości pełzania toków szynowych. Jest to więc ocena sił podłużnych pojawiających się w wyniku przemieszczeń szyn na odcinku pomiędzy przekrojami kontrolnymi. Ta metoda pomiaru, jakkolwiek nie wymagająca specjalistycznego oprzyrządowania, jest pracochłonna i mało dokładna ze względu na trudności z odtwarzaniem przekrojów kontrolnych i błędy pomiaru położenia punktów względem przekroju.

Zasadnicza trudność oceny rzeczywistych rozkładów sił podłużnych w szynach na długości toru polega na niedoskonałości stosowanych metod pomiaru sił lub naprężeń. Do stosowanych od wielu lat sposobów oceny sił podłużnych należą pomiary za pomocą ekstensometrów. Inne metody pomiaru, z których jedynie część mogłaby znaleźć zastosowanie w praktyce, są następujące:

- Ocena sił podłużnych na podstawie ugięcia szyny pod obciążeniem punktowym. Wynik pomiaru zależy od tłumienia konstrukcyjnego w układzie szyna – podkład;
- Ocena za pośrednictwem pomiaru drgań szyny pobudzonej impulsowo. Prędkość przebiegu fali wzbudzenia zależy od wielkości naprężeń w szynie. Metoda ta okazała się trudna do zastosowania w eksploatowanym torze;
- Ocena na podstawie zmian własności magnetycznych stali szynowej. Zwiększenie naprężeń powoduje zmianę pola powierzchni histerezy magnetycznej. Miarą naprężeń mechanicznych jest w tej metodzie tzw. współczynnik anizotropii pola powierzchni pętli histerezy. Zależność współczynnika anizotropii od temperatury szyny jest teoretycznie liniowa, jednakże wymagana jest znajomość początkowego stanu naprężeń. Metoda sprawdzona w laboratorium; w eksploatacji z uwagi na zakłócenia, zwłaszcza na liniach zelektryfikowanych, nie daje pozytywnych wyników;
- Ocena na podstawie szumu Barkhausena lub dyfrakcji promieni Roentgena – w obu przypadkach uzależniona jest od stanu warstwy powierzchniowej szyny i wymaga cechowania na próbkach materiału identycznego z materiałem badanej szyny. Na wynik wpływa również poziom naprężeń własnych szyny;
- Metody magneto-sprężyste (Railscan, Railtest) wykorzystują zależność między własnościami magnetycznymi stali szynowej a naprężeniami. Wynik pomiaru uzależniony jest od rodzaju materiału szyny i stanu naprężeń własnych;
- Metody pomiaru naprężeń metodą ultradźwiękową wykorzystują zjawiska elastoakustyczne, a do pomiaru stosuje się głowice piezoelektryczne lub prze-

tworniki elektromagnetyczno-akustyczne (EMAT). Wyniki uzależnione są od mikrostruktury stali i stanu powierzchni szyn.

Jednym z przyrządów umożliwiających pomiar siły podłużnej w szynie jest MS-02. Miernik ten, dzięki cechom materiałowym i konstrukcyjnym, charakteryzuje taki sam współczynnik rozszerzalności cieplnej jak szynę. Podobnie prędkość absorpcji energii cieplnej przyrządu zbliżona jest do absorpcji cieplnej szyny. Przyrząd ten rejestruje wydłużenie lub skrócenie bazy pomiarowej wywołane zmianą temperatury szyny oraz zewnętrznymi obciążeniami eksploatacyjnymi po przyłożeniu do trzpieni zamocowanych w osi obojętnej szyny (rys. 4).



Rys. 4. 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. Miernik skonstruowany jest na bazie suwmiarki elektronicznej, przy czym wartości pomiarowe odczytywane są bezpośrednio w jednostkach siły. Dokładność odczytu siły wynosi 5 kN.

W ostatnim okresie zanotowano pewien postęp badań wskazujący na możliwości wykorzystania do tego celu metod ultradźwiękowych. Metodą pomiarową, która znalazła zastosowanie w ocenie 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 temperatury, gęstości masy materiału, stałych elastoakustycznych oraz występujących naprężeń. Metoda ta (system DEBRO) znalazła zastosowanie w badaniach toru bezстыkowego *in situ* [1],[3].

Ostatnie badania wykonywane w Japonii wskazują, że możliwe jest wykorzystanie zależności stanu naprężeń (sił podłużnych) w szynach od drgań własnych konstrukcji nawierzchni [9]. Z uwagi na to, że drgania te zmieniają się na długości toru w zależności od stanu podsypki, przytwierdzeń i rozstawu podkładów, jak również temperatury szyn, posłużono się analizą FEM w celu korygowania błędu pomiaru. Na rysunku 6 pokazano schemat stanowiska doświadczalnego, na którym po impulsowym pobudzeniu szyny do drgań mierzono wartość siły podłużnej w szynie i jej temperaturę.

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 wyboczeniem toru. Informacje przekazywane są drogą radiową i gromadzone w bazach danych. Mogą być również przekazywane obsłudze pociągu oraz wykorzystane przez służbę zabezpieczenia ruchu.

4. PODSUMOWANIE

Znajomość rozkładów i wielkości naprężeń (sił podłużnych) w szynach toru bezстыkowego jest istotna przede wszystkim ze względu na potrzebę oceny jego bezpieczeństwa w eksploatacji. Ważna jest również dla procesu eksploatacji szyn i oceny powstawania i rozwoju uszkodzeń szyn.

Metody ultradźwiękowe wykorzystujące efekt elastoakustyczny nie znalazły dotychczas zastosowania w rutynowej diagnostyce toru bezстыkowego, natomiast są przydatne między innymi do kontroli stanu naprężeń własnych w zakładach produkujących szyny kolejowe.

Stan obecnych badań wskazuje, że nie opracowano dotychczas metody umożliwiającej bezpośredni pomiar rzeczywistych naprężeń lub sił podłużnych w szynach eksploatowanego toru.

LITERATURA

- [1] Adamski M., Szelażek J.: Ocena naprężeń w szynach toru bezстыkowego. Sprawozdanie z badań, Pracownia Ultradźwiękowych Badań Materiałów IPPT-PAN, Warszawa 1998.
- [2] Czyczuła W., Massel A., Towpik K.: PKP and TU-Kraków interim report on empirical research of CWR track long term behaviour, Utrecht 1997.
- [3] Deputat J.: Properties and advantages of elastoacoustic phenomena to the measurements of residual stress, IPPT-PAN, 28, Warszawa 1990.
- [4] ERR D 202/RP 12. „Verbesserung der Kenntnis der Kräfte im lückenlosen Gleis“. Schlussbericht, Utrecht 4/1999.
- [5] Guericke W., Weiser J., Schmedders H., Danneberg R.: „Ursachen von Schienen-Eigenstressungen infolge Rollrichtens und Beitrag zur Verringerung“, Eisenbahntechnische Rundschau 1995, nr 7–8.

- [6] Świdzski Z.: „Badania jakości i trwałości szyn kolejowych“, Problemy Kolejnictwa, zeszyt 125, CNTK, Warszawa 1991.
- [7] Towpik K.: “Variability of stress and longitudinal force distributed in continuous welded rail tracks”, Archives of Civil Engineering 2006, LII, 4.
- [8] Towpik K.: Infrastruktura drogi kolejowej. Obciążenia i trwałość nawierzchni, Biblioteka Problemów Eksploatacji, Warszawa–Radom 2006.
- [9] Urakawa F., Abe K., Takahashi: “Improvement of accuracy of method for measuring axial force of rail based on natural frequency”, QR of RTRI 2016, vol. 57, no. 2, 5.
- [10] Zboiński K., Woźnica P. Optimisation of railway polynomial transition curves: a method and results. In J. Pombo, (Editor), Proceedings of the First International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance, Civil-Comp Press, Stirlingshire, 2012.

POSSIBILITIES OF STRESS STATE EVALUATION IN CONTINUOUS WELDED RAILS

Summary

In the paper the variability of stresses (and corresponding longitudinal forces) observed in continuous welded rail (CWR) during service were described. The main sources of stresses are rail temperature changes, train/track interaction and residual stresses resulted from the manufacturing process. A knowledge of stress distribution in rails is very important for CWR track safety assessment in service and essential for understanding the rail defects development. The different methods of stress (longitudinal forces) measurements in rails were also presented.

Keywords: CWR track, rail defects, stress measurements

Dane autora:

Prof. dr hab. inż. Kazimierz Towpik

Międzynarodowa Wyższa Szkoła Logistyki i Transportu we Wrocławiu
Zakład Transportu

e-mail: kztowpik@poczta.onet.pl