

Dariusz Kowalczyk, Łukasz Antolik\*, Ireneusz Mikłaszewicz  
Instytut Kolejnictwa, Warszawa

# Badania wad typu head check w szynach kolejowych metodą tomografii komputerowej jako element procesu optymalizacji układu przetworników ultradźwiękowych

## Researches of the head check defect in rails using CT method as a part of the proces focused on optimalisation ultrasonic transducers system

### ABSTRACT

The paper presents a method and the results of the CT test of the head-check defect which commonly occurs in rails. It is one of the most dangerous defects which cause a rail discontinuity. The methods of simulation of the ultrasonic wave and projection possibilities of the real defect have been taken under consideration.

**Keywords:** rail, ultrasound examination; head checking

### STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono metodę oraz wyniki badań metodą tomografii komputerowej wady typu head-check występującej powszechnie w torach eksploatowanych. Jest to jedna z najniebezpieczniejszych wad występujących w szynach kolejowych, która może doprowadzić do pęknięcia szyny. Omówiono także metody symulacji propagacji wiązki ultradźwiękowej oraz możliwości odwzorowania wady rzeczywistej w zależności od stosowanego oprogramowania symulacyjnego.

**Słowa kluczowe:** szyna kolejowa; badania ultradźwiękowe; head checking

### 1. Wstęp

Wady szyn kolejowych tworzą się na kilku etapach produkcji oraz użytkowania. Wady wewnętrzne szyn powstają w procesie metalurgicznym tj. na etapie wytapiania i odlewania. Do wad wówczas powstających możemy zaliczyć wszelkie wewnętrzne nieciągłości materiału, głównie pozostałości jamy usadowej oraz duże skupiska wtrąceń niemetalicznych. Proces walcowania szyn kolejowych może powodować powstanie wad powierzchniowych szyn w postaci rys, wgniotów po zgorzelinie na powierzchni tocznej szyny lub powstanie struktury gruboziarnistej materiału. Z kolei proces prostowania szyn po walcowaniu sprzyja powstawaniu naprężeń wewnętrznych w szynach, co w konsekwencji może prowadzić do wystąpienia krzywizny szyn, jak również pęknięcia szyn w torach.

W wyniku poprawy jakości materiału na szyny i metod produkcji stali w ciągu ostatnich lat, uszkodzenia szyn z powodu uszkodzeń produkcyjnych znacznie zmalały. Zauważa się zwłaszcza zmniejszenie uszkodzeń spowodowanych nieciągłością materiału wewnątrz szyny. Szczególnie ważne było zmniejszenie częstotliwości występowania uszkodzeń metalurgicznych wskutek poprawy czystości stali i wad z tym związanych, jak na przykład jama usadowa. Osiągnięto to dzięki wprowadzeniu procesu próżniowego odgazowania i technice ciągłego odlewania.

Po przejściu w torach na szyny bezстыkowe spawane i zgrzewane, zmniejszyła się liczba uszkodzeń przy końcach szyn, natomiast wzrosła liczba uszkodzeń w strefie łączy. Spowodowane było to w większości niedotrzymaniem parametrów zalecanych przez technologię spawania. Natomiast łączenia szyn metodą zgrzewania znacznie poprawiło jakość łączenia, zatem ilość wad spowodowana tą technologią na skutek wysokiej powtarzalności i kontroli procesu zgrzewania znacznie zmalała.

Zwiększenie prędkości jazdy pociągów i intensywności ruchu spowodowało, że szyny są poddawane coraz większym naprężeniom kontaktowym i stąd wynika ogólny wzrost ich uszkodzeń. Wzrosła zwłaszcza liczba uszkodzeń spowodowanych zmęczeniem materiału widocznych jako pęknięcia na powierzchni główki szyn. Stanowią one bardzo duży odsetek wykrywanych wad szyn, tj. ok. 10%.

Wadami eksploatacyjnymi powierzchni szyn o charakterze zmęczeniowym są wady typu squat i shelling [1] powstałe przeważnie na skutek miejscowego rozwarstwienia warstwy powierzchniowej szyn i jej wykruszenia, które wcześniej uległy tzw. buksowaniu lub gwałtownemu hamowaniu kół jednostki napędowej oraz falistość szyn [2]. Nalepienia oraz złuszczenie się powierzchni tocznej ma związek z mikropoślizgiem i zjawiskami tarcia przy współpracy koła z szyną. Powstała wówczas wada w postaci białej warstwy wykazuje wysoką twardość i kruchość. Pęknięcie najczęściej postępuje w głąb główki szyny i może doprowadzić do całkowitego

\*Autor korespondencyjny. E-mail: lantolik@ikolej.pl

złamania szyny [3]. Przyczyny powstawania tych wady nie są do końca znane, jednak należy przypuszczać że mechanizmem powodującym powstawanie tych wad jest mechanizm zmęczeniowy, a źródłem nierówności powierzchnia szyny, a także segregacja składu chemicznego oraz różnice w budowie struktury materiału szyn produkowanych w hutach. Wady tego typu występują w zdecydowanej większości na prostych odcinkach toru.

Katalog wad w szynach rozróżnia podgrupę wady typu shelling, widoczną na szynie w postaci grup szczelin na wewnętrznej krawędzi główki szyny. Jest to forma nadpęknięć kontaktowo-zmęczeniowych, tj. head check w różnych konfiguracjach. W łukach torów o małym promieniu powstają drobne spęknięcia krawędzi główki szyny jako efekt działania obrzeża koła, które ulegają rozwojowi w dalszej eksploatacji (Rys. 1). Nadpęknięcia te tworzą się na skutek silnego miejscowego zgniotu odwęgłonej warstwy powierzchniowej główki szyny. Powierzchnia szyny na skutek zgniotu wywołanego naciskiem koła, generuje szereg wyżej opisanych wad. W pierwszym etapie są to płytkie, mikropęknięcia, które w miarę przeniesienia obciążenia przez szynę ulegają rozrostowi. W miarę zwiększania stopnia zgniotu, następuje zmniejszenie stopnia płynięcia warstwy powierzchniowej, jej umocnienie poprzez tworzenie defektów strukturalnych, następnie w miejscach najsilniejszego zgniotu, a po przekroczeniu granicy wytrzymałości materiału tworzenie się nadpęknięć. Zachodzący jednocześnie proces ścierania powierzchni tocznej jest zbyt wolny, aby proces powierzchniowego umacniania materiału był eliminowany. Na odcinkach prostych torów w miejscach o niskiej stabilności rusztu torowego, w szczególności w miejscach widocznych wychłapek przy podkładach, nadpęknięcia występują w postaci głębokich wad krawędzi główki szyny, rzadziej ułożone (Rys. 2). Mechanizm tworzenia się tych wad jest podobny, z tym że dochodzą dodatkowo silne naprężenia zginające związane z nierównością torów oraz zwiększoną dynamiką jazdy na tych odcinkach, co wspomaga powstawanie i rozwój pęknięć zmęczeniowych [4].

Wszystkie wady typu head check występujące w torach eksploatowanych są stwierdzane na podstawie inspekcji wizualnej, co uniemożliwia określenie przybliżonej głębokości, a tym samym możliwego zagrożenia dla integralności szyny kolejowej. Analiza wielu przypadków praktycznych oraz literatury wskazuje, że możliwe jest określenie przybliżonej głębokości wady, choćby metodą prądów wirowych, lecz w praktyce nie jest to stosowane z powodzeniem. Dodatkowo szacowanie głębokości zalegania wady jest bardziej dokładne dla szyn nieobrabianych mechanicznie w trakcie eksploatacji. Po wielokrotnych zabiegach szlifowania długość wady na powierzchni może słabiej korelować z pęknięciem znajdującym się w głębi główki szyny.

W ramach prowadzonych badań przemysłowych podjęto się między innymi wypracowania zoptymalizowanego układu przetworników ultradźwiękowych dedykowanego do wykrywania m. in. wad typu head check charakterystycznych dla polskiej sieci kolejowej i przy uwzględnieniu różnego stopnia zużycia główki szyny. Do tego celu wykorzystano tomografię komputerową jako jedyną dostępną

metodę umożliwiającą poznanie geometrii wady w całym przekroju szyny z wymaganą rozdzielczością.



Rys. 1. Wada head check w stanie początkowym [źródło własne]  
Fig. 1. Head check defect at the early stage [own source]



Rys. 2. Wada head check w stanie zaawansowanym [źródło własne]  
Fig. 2. Head check defect at the advanced stage [own source]

## 2. Wykonanie badań

W przedstawionej części eksperymentu uwagę poświęcono stosunkowo zaawansowanym wadom określanym w katalogu wad numerem 2223, które są charakterystyczne dla prostego odcinka toru. Te powtarzające się cyklicznie wady stanowią ogromne niebezpieczeństwo z uwagi na możliwość wystąpienia wielokrotnego złamania szyny na długości kilku metrów. Z uwagi na wymiary szyny kolejowej oraz biorąc pod uwagę fakt, że wady główki szyny znajdują się w najgrubszym miejscu przekroju szyny, a także zważając na ograniczoną moc dostępnych stanowisk CT, wykonano wstępne próby skanowania przygotowanych próbek przy dostępnych mocach lamp. Zadowalające rezultaty uzyskano na wycinkach o wymiarach ok. (szer/dł/wys) 40/60/15 mm. przy użyciu lampy o mocy 300 kV i prądu w zależności od próbki 220-250 A. Przy ekspozycji stosowano filtry 1 mm. Cu + 0,5 Sn. Przykładowe próbki do badań zaprezentowano na poniższych zdjęciach (Rys. 3-4).

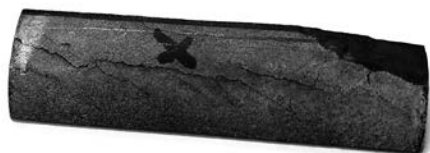
W celu uzyskania zadowalającej rozdzielczości do obserwacji pęknięć i mikropęknięć, próbki ustawiano na stanowisku badawczym pod różnymi kątami, umożliwiając wiązce przechodzenie przez materiał próbki jak najkrótszą drogą. Pomimo tego wykonanie szczegółowego mapowania jednej próbki zajmowało nawet kilka godzin. Jako mierzalne cechy charakterystyczne wad HCH przyjęto:

- długość wady na powierzchni tocznej szyny;
- głębokość zalegania wady mierzona w płaszczyźnie przekroju poprzecznego szyny;
- kąt propagacji w płaszczyźnie poziomej mierzony względem kierunku jazdy;
- kąt propagacji w płaszczyźnie pionowego przekroju poprzecznego szyny.



Rys. 3. Wada head check przygotowana do badań CT [źródło własne]

Fig. 3. Head check defect prepared to CT test [own source]



Rys. 4. Wada head check przygotowana do badań CT [źródło własne]

Fig. 4. Head check defect prepared to CT test [own source]

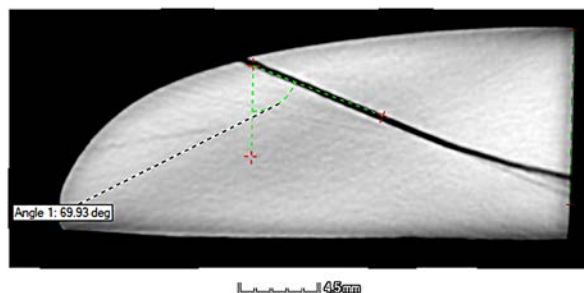
Na rysunku (Rys. 5) przedstawiono przykład prezentacji 3D próbki w wizualizerze myVGL natomiast na rysunku (Rys. 6) przedstawiono metodę pomiaru kąta propagacji pęknięcia w płaszczyźnie przekroju poprzecznego. W tabeli (Tab. 1) przedstawiono wyniki pomiarów cech charakterystycznych wad wykonanych przy użyciu wspomnianego edytora.

W pierwszej kolejności zauważono, że kąt propagacji względem osi podłużnej szyny zawiera się w przedziale (35-52)°, co jest charakterystyczną wartością dla wszystkich wad typu head check. W publikacji [5] określono jeszcze szerszy zakres kątowy propagacji pęknięcia na powierzchni szyny wynoszący (35-70)° w zależności od przeważającej geometrii styku koła z szyną. W analizowanych przypadkach odległości pomiędzy pęknięciami wynosiły zazwyczaj od ok. 3 do 20 mm, co jest zależne od materiału, z którego wykonano szynę oraz od lokalnych uwarunkowań eksploatacyjnych. Kolejną cechą charakterystyczną jest kąt wnikania wady w głąb materiału, który mierzono jako kątowe odchylenie pęknięcia od normalnej. Na podstawie kilkunastu pomiarów oszacowano, że wartość tego kąta zawiera się w przedziale ok. (60-70)° w 50% przypadków, natomiast z uwagi na lokalne uwarunkowania oraz zmianę kąta propagacji w głębi materiału kąt ten wynosi od 52° do 105° względem normalnej. Ostatnia wartość wskazuje, że wada może rozwijać się nie tylko w głąb materiału szyny, ale również może propagować równoległe do powierzchni toczonej, co może grozić odspojeniem się części główki szyny.



Rys. 5. Wizualizacja próbki w programie w edytorze „myVGL”

Fig. 5. Visualisation of the sample using „myVGL” software



Rys. 6. Wizualizacja sposobu pomiaru kąta wnikania wady w głąb materiału

Fig. 6. Visualisation of the angle measurement

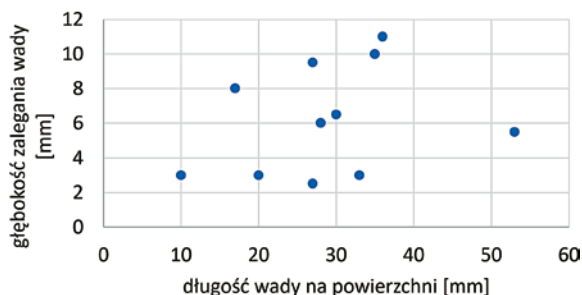
Tab. 1. Wyniki pomiarów cech charakterystycznych wad HCH  
Tab. 1. Results of measurements of the characteristic features of the HCH defects

| Nr próbki | Długość wady na powierzchni [mm] | Głębokość zalegania wady [mm] | Kąt propagacji wady w płaszczyźnie poziomej [deg] | Kąt propagacji wady w płaszczyźnie pionowej [deg] |
|-----------|----------------------------------|-------------------------------|---|---|
| 5_19      | 35                               | 10                            | 43  | 69  |
|           | 53                               | 5,5                           | 43  | 67-100  |
| 5_19_a    | 27                               | 9,5                           | 48  | 72  |
|           | 30                               | 6,5                           | 46  | 68-105  |
|           | 17                               | 8                             | 44  | 65-85   |
| 8_19      | 36                               | 11                            | 46  | 65-100  |
|           | 28                               | 6                             | 52  | 52  |
| 19_19_II  | 10                               | 3                             | 35  | 88  |
|           | 20                               | 3                             | 35  | 85  |
|           | 27                               | 2,5                           | 35  | 88  |
|           | 33                               | 3                             | 35  | 90  |

Gdyby pomiary kąta wnikania pęknięcia wykonywano względem normalnej poprowadzonej właśnie w tym miejscu, kąt ten oscylowałby zazwyczaj w przedziale (0-20)° i nie stanowiłby wartościowego odniesienia do powierzchni toczonej szyny, po której prowadzone są głowice do badań techniką ultradźwiękową.

Ostatnimi interesującymi autorów parametrami wad typu head check są wymiary liniowe, czyli długość wady na powierzchni i głębokość zalegania wady mierzona od najwyższego punktu główki szyny. Wielkości te scharakteryzowano w powyższej tabeli (Tab. 1) oraz zilustrowano na poniższym wykresie (Rys. 7). Okazuje się, że w tym przypadku brak jest jednoznacznej zależności. Przypuszczalnie większa ilość pomiarów mogłaby stanowić narzędzie rozstrzygające. Jednak niezależnie od tego można sądzić, że im dłuższa wada na powierzchni jest większa, tym większa jest szansa na głębsze jej zaleganie pod powierzchnią toczonej szyny.

Z punktu widzenia techniki ultradźwiękowej istotnym wnioskiem z analizy danych jest ograniczenie w postaci stosunkowo niewielkiej głębokości zalegania przedstawionych próbek wynoszącej od ok. 3 mm do 11 mm pomimo ich stosunkowo dużego stopnia degradacji. Z drugiej strony można podjąć próbę wykorzystania efektu narożnikowego, którego sposób tworzenia opisano w kolejnym rozdziale.



Rys. 7. Zależność głębokości zalegania wady od jej długości na powierzchni [źródło własne]

Fig. 7. Relationship between the depth of the crack and his length on the surface [own source]

### 3. Model symulacyjny wady

W zależności od wymaganej dokładności prowadzenia symulacji, spodziewanych efektów końcowych i możliwości środowiska symulacyjnego, wada ekwiwalentna może mieć różny charakter. Najbardziej precyzyjne rozwiązanie stanowi przetworzenie warstw radiogramów na chmurę punktów czytelną przez środowisko symulacyjne. Takie rozwiązanie umożliwia symulację rzeczywistej wady przy uwzględnieniu niedoskonałości obiektu badanego.

Jedno z uproszczonych rozwiązań można przygotować w oparciu o wiedzę na temat wartości kąta wnikania wady w materiał w płaszczyźnie pionowej i poziomej, które pozyskano i przedstawiono w poprzednim rozdziale. Można wówczas wykreślić płaszczyzny, których przecięcie wyznacza uproszczoną geometrię wady możliwą do zaimplementowania w środowisku symulacyjnym. Innym rozwiązaniem z kolei jest symulowanie wady rzeczywistej poprzez odpowiednią wykorzystanie predefiniowanej wady oraz określenie jej orientacji i rozmiaru. Każda z przedstawionych metod będzie znacznie bardziej dokładnym i profesjonalnym narzędziem w stosunku do metody prób i błędów, bardzo pracochłonnej i wymagającej niekiedy wykonywania bardzo skomplikowanych obliczeń. Kiedy obiektem badanym jest wyrób o skomplikowanej geometrii, np. szyna kolejowa, zastosowanie komputerowego środowiska symulacyjnego stanowi już pewien standard.

Metoda elementów skończonych, w skrócie MES, jest obecnie jednym z podstawowych narzędzi modelowania numerycznego we współczesnej nauce i technice. Jednak jej zastosowanie do modelowania propagacji fal ultradźwiękowych w typowych obiektach będących przedmiotem badań nieniszczących natrafia na istotne trudności metodologiczne oraz ograniczenia praktyczne związane z bardzo dużymi wymaganiami odnośnie wydajności systemów komputerowych [6].

Innym rozwiązaniem jest wykorzystanie dedykowanej platformy wykorzystującej do symulacji i analizy propagacji fal ultradźwiękowych metodę ray tracing (np. BeamTool firmy Eclipse Scientific). Przedstawione oprogramowanie nie tylko modeluje propagację wiązki ultradźwiękowej, ale pozwala również symulować zobrazowania typu A-scan, projektować głowice ultradźwiękowe dla technik PE, TT, ToFD, Phased Array oraz próbki odniesienia do kalibracji projektowanych systemów ultradźwiękowych [7].

W celu symulacji propagacji wiązki ultradźwiękowej w szynie kolejowej, a także mając na względzie jak najdokładniejsze wykrywanie wad typu head check, analizy optymalizacyjne zostaną wykonane w oparciu o platformę BeamTool 9, przy wykorzystaniu predefiniowanych wzorców wad, których rozmiary oraz umiejscowienie na przekroju głowki szyny zostaną zdefiniowane po dyskretyzacji zebranych dostępnych wad rzeczywistych.

### 4. Podsumowanie

Proces optymalizacji układu przetworników ultradźwiękowych jest bardzo złożonym zadaniem. Celem jest zdefiniowanie najbardziej optymalnej głowicy lub zestawu głowic do skutecznego wykrywania możliwie jak najmniejszych wad typu head check o cechach charakterystycznych dla krajowej infrastruktury kolejowej tj. zróżnicowanie charakteru wady i zróżnicowanie stopnia zużycia szyny. Założono w tym przypadku, że możliwe jest osiągnięcie czułości badania dla wad head check w postaci ekwiwalentnego otworka o średnicy 3 mm., co w pełni wypełnia cel, jakim jest podniesienie poziomu bezpieczeństwa przewozu kolejów osób i towarów. W artykule przedstawiono dwa kluczowe kroki z zaplanowanego procesu, jakimi są pozyskanie modeli wad rzeczywistych i ich analiza oraz modelowanie wad sztucznych w oprogramowaniu symulacyjnym. W przedstawionych krokach bardzo istotne jest zebranie jak największej ilości informacji o występującej wadzie i jej naturze oraz przełożenia tych informacji na dane, które będą stanowiły wartość użytkową dla etapu symulacji propagacji wiązki ultradźwiękowej.

### 5. Literatura/References

- [1] Mikłaszewicz I. „Wady i uszkodzenia szyn, powstawanie i eliminacja”. Prezentacja na Konferencji Drogi szynowe, Warszawa 2015
- [2] Bogdaniuk B., Massel A., Pomiar nierówności powierzchni tocznych szyn na liniach PKP, Problemy Kolejnictwa, zeszyt 120, CNTK Warszawa 1995
- [3] Licow R., Tomaszewski F., Analiza przyczyn zużywania się (uszkodzenia) szyn w zależności od warunków techniczno – eksploatacyjnych toru, Pojazdy szynowe nr 4/2017
- [4] Mikłaszewicz I., Odwęglenie a wady powierzchni głowki szyn, Problemy Kolejnictwa, Tom 58/2014, Zeszyt 165, str. 85-96.
- [5] Heyder R. Nowy Katalog UIC uszkodzeń szyn - Technika Transportu Szynowego nr. 1-2:2002
- [6] Mackiewicz S. Modelowanie propagacji fal ultradźwiękowych w badaniach nieniszczących. Materiały konferencyjne. XXV Seminarium Nieniszczące Badania Materiałów, Zakopane 20-22 marca 2019
- [7] Katz T. Oprogramowanie do modelowania propagacji fal ultradźwiękowych metodą ray tracing. Materiały konferencyjne. XXV Seminarium Nieniszczące Badania Materiałów, Zakopane 20-22 marca 2019

Praca powstała w wyniku realizacji projektu badawczego o nr POIR.04.01.01.-00-0011/17 finansowanego ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju w ramach Wspólnego Przedsięwzięcia BRIK.