

# Promieniowanie jonizujące w badaniach nieniszczących – Część 2 – Wybrane zagadnienia związane z implementacją badań radiograficznych do diagnostyki złączy szyn kolejowych na infrastrukturze PKP PLK S.A.

Małgorzata OSTROMEŃKA<sup>1</sup>

## Streszczenie

W artykule przedstawiono główne zagadnienia i trudności związane z implementacją badań radiograficznych do diagnostyki złączy szynowych prowadzonych, w warunkach polowych, na infrastrukturze PKP PLK. Opisano zakres wytycznych, które należy utworzyć lub zmodyfikować w odniesieniu do konieczności zastosowania promieniowania jonizującego oraz wskazano możliwe obszary umożliwiające skrócenie czasu wykonywanych badań.

**Słowa kluczowe:** badania nieniszczące, radiografia przemysłowa, złącze spawane, złącza szyn kolejowych

## 1. Wprowadzenie

Nieniszczące metody badań nie powodują zmian właściwości użytkowych elementu, nie naruszają jego ciągłości, nie powodują również zmian jego mikro- i makrostruktury. Dzięki nim można uzyskać informacje na temat miejsca występowania i rodzaju niezgodności materiałowej wewnątrz materiału lub na jego powierzchni. Możliwe jest określenie rodzaju nieciągłości, jej położenia i kierunku propagacji. Dodatkowo, badania nieniszczące można stosować w celu wykrycia miejsc naprężeń lub miejsc zaatakowanych przez korozję międzykrystaliczną. Zestaw tych informacji umożliwia zakwalifikowanie elementu do właściwej klasy jakościowej i oszacowanie jego czasu życia oraz ocenę możliwości dalszej eksploatacji. W przypadku złączy spawanych stosuje się następujące badania nieniszczące:

- wizualne,
- penetracyjne,
- magnetyczno-proszkowe,
- metodą prądów wirowych,
- radiologiczne,
- ultradźwiękowe.

Dla tych wszystkich metod badawczych opracowano stosowne normy, które porządkują i ujednolicają przepisy odbioru na podstawie wyników tych badań [1–9].

W przypadku spawalnictwa szyn kolejowych badania radiograficzne nie są stosowane, a standardowe badania wolumetryczne stanowią badanie ultradźwiękowe. Procedury (dla infrastruktury zarządzanej przez PKP PLK S.A.) dopuszczające wykonawców spoin termitowych, jak i zgrzewanych w zgrzewalni lub zgrzewarkami w torach, nie przewidują w Polsce badań z udziałem promieniowania jonizującego [10–12]. Badania takie nie są realizowane w torach i nie ma wytycznych, które mogłyby je umożliwić.

Literatura naukowa dotycząca zagadnień związanych z badaniami nieniszczącymi szyn kolejowych również najczęściej pomija tę opcję [13–16], choć czasem podaje, że metodę radiologiczną stosuje się, aby potwierdzić wady w spoinach termitowych lub krzyżownicach i rozjazdach wykryte wcześniej inną metodą nieniszczącą [17].

Jednakże zastąpienie badań radiologicznych badaniami ultradźwiękowymi nie zawsze jest korzystne. Niektóre niezgodności łatwiej jest zidentyfikować metodą radiograficzną, a biorąc pod uwagę bezpieczeństwo pasażerów, które jest priorytetem w transporcie kolejowym, nie należy całkowicie rezygnować z tej formy diagnostyki złączy szyn kolejowych wykonywanych technikami spawalniczymi.

Obecne tendencje rozwojowe badań nieniszczących w kolejnictwie światowym skupiają się głównie

<sup>1</sup> Dr inż.; Instytut Kolejnictwa, Laboratorium Badań Materiałów i Elementów Konstrukcji; e-mail: mostromecka@ikolej.pl.

na automatyzacji badania, stosowaniu rozwiązań zdalnych oraz sztucznej inteligencji [18–20] i nie obejmują szczególnego rozwoju w kierunku badań radiologicznych. Radiografia jednakże oferuje coraz bardziej wygodne rozwiązania w postaci detektorów cyfrowych, eliminując długotrwałą obróbkę fotochemiczną błon, na korzyść zastosowania płyt luminoforowych lub paneli płaskich. Cyfrowa radiografia pozwala również zmniejszyć energię promieniowania przy jednoczesnym skróceniu czasu ekspozycji. Umożliwia to otrzymanie w relatywnie krótkim czasie wyniku, który jest zapisany w formie elektronicznej i może być poddawany (w przypadku wątpliwości przy interpretacji) wielokrotnej weryfikacji.

## 2. Nieniszczące badania wolumetryczne szyn kolejowych i złączy szyn

Badania wolumetryczne (objętościowe) umożliwiają wykrywanie wewnętrznych niezgodności materiału. Do metod wolumetrycznych badania spoin należą badania ultradźwiękowe i radiograficzne. Istnieje wiele opracowań, opisujących wady i zalety obu rodzajów badań,

jak również artykułów przedstawiających ich praktyczne zastosowania [21–26], niestety publikacje dotyczące badania szyn kolejowych metodami radiograficznymi są nieliczne [23].

W większości opracowań, badania radiograficzne i ultradźwiękowe są uznane za komplementarne. Autorzy [21] stwierdzają we wnioskach (...) *Nie ma uniwersalnej metody badań, a badając złącze spawane różnymi metodami można uzyskać inne informacje o jego własnościach i jakości (...)* oraz przedstawiają porównanie metod radiologicznych i ultradźwiękowych ze wskazaniem dotyczącym ich stosowania. Na podstawie tych opracowań, przyjmując opcję radiografii cyfrowej, powstaje porównanie metod, które uzasadnią celowość wykorzystania radiografii w diagnostyce złączy szynowych (tabl. 1).

Osobnym zagadnieniem, które nie zostało ujęte w tabelicy 2, jest wpływ mikrostruktury materiału – na przykład wielkości ziarna na wybór metody badania. W przypadku spawalnictwa kolejowego najbardziej rozpowszechnionymi technikami łączenia szyn jest spawanie termitowe i zgrzewanie doczołowe z wyiskrzaniem. Przy zgrzewaniu szyn otrzymujemy najczęściej struktury drobnoziarniste, natomiast spawanie termitowe sprzyja powstawaniu struktur gruboziarnistych.

Tabela 1

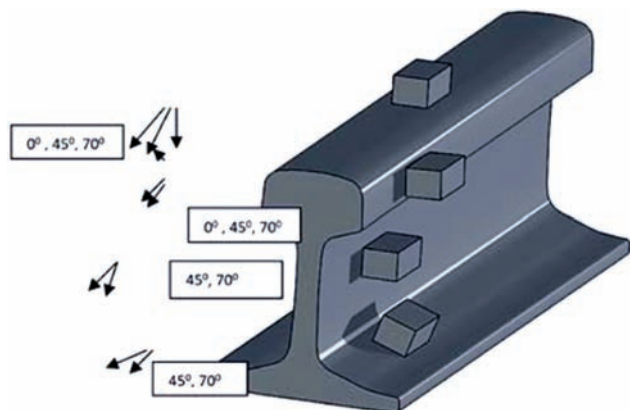
Porównanie metody radiologicznej i ultradźwiękowej

Metoda radiologiczna (RT)	Metoda ultradźwiękowa (UT)
Niska wykrywalność niezgodności płaskich, umiejscowionych prostopadle w stosunku do kierunku emitowanego promieniowania	Bardzo wysoka wykrywalność niezgodności płaskich, umiejscowionych prostopadle w stosunku do kierunku emitowanej fali ultradźwiękowej
Stosunkowo wysoka wykrywalność niezgodności płaskich umiejscowionych równoległe do kierunku emitowanego promieniowania	Zerowa wykrywalność niezgodności płaskich umiejscowionych równoległe do kierunku emitowanej fali ultradźwiękowej
Zerowa możliwość wskazania miejsca występowania niezgodności umiejscowionych równoległe do kierunku emitowanego promieniowania (chyba, że stosuje się więcej niż jeden kierunek promieniowania)	Całkowita możliwość wskazania miejsca występowania niezgodności
Do badania musi być zapewniony dostęp z obu stron badanej powierzchni	Do badania wystarczy dostęp z jednej strony badanej powierzchni – w przypadku metody echa i TOFD
Powierzchnia kontaktowa praktycznie nie wpływa na jakość badania	Powierzchnia kontaktowa wpływa na jakość badania – chropowatość powierzchni w dużej mierze utrudnia lub nawet całkowicie uniemożliwia jego przeprowadzenie
Możliwość badania dużych powierzchni w stosunkowo krótkim czasie	Metoda bardzo praco- i czasochłonna przy badaniu dużych powierzchni
Łatwość w wykonaniu badania złączy o skomplikowanym kształcie oraz złączy obwodowych rur o małych i dużych średnicach	Trudność w wykonaniu badania złączy o skomplikowanym kształcie oraz złączy obwodowych rur o małych i dużych średnicach
Możliwość badania metali i ich stopów oraz niemetali, dodatkowo możliwość wykrywania obiektów wewnątrz innych	Możliwość badania metali i ich stopów oraz niemetali
Szkodliwość czynnika badającego dla zdrowia	Brak szkodliwości czynnika badającego dla zdrowia

Opracowanie własne na podstawie [21].

Podczas badania ultradźwiękowego duże rozmiary ziaren powodują rozpraszanie fal na ich granicach, co skutkuje zarówno znacznym wzrostem współczynnika tłumienia, jak też podwyższeniem poziomu szumów strukturalnych. W rezultacie, oprócz ogólnego pogorszenia stosunku sygnał – szum SNR, interferencje fal rozproszonych mogą czasem prowadzić do powstawania wskazań pozornych [27].

Obecnie, wytyczne dla wolumetrycznych badań diagnostycznych szyn kolejowych, czyli badań ultradźwiękowych są oparte na wymaganiach zawartych w Instrukcjach Id-10 [28] oraz Id-17 [29], które w 2005 roku zostały opracowane przez PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. Instrukcje te przewidują możliwość wykonywania badań ultradźwiękowych ręcznie lub automatycznie. Podczas badania szyny metodą ręczną stosuje się głowice pojedyncze i podwójne na fale podłużne o kącie  $0^\circ$  i fale poprzeczne o kącie  $45^\circ$  i  $70^\circ$  oraz częstotliwości 2–3 MHz. W przypadku połączeń szyn spawanych termitowo korzysta się również z metody tandem z zastosowaniem dwóch głowic o kącie  $45^\circ$ . Czasochłonna metoda ręczna umożliwia zbadanie powierzchni tocznej oraz bocznej głowki szyny, a także z obu stron stopki (rys. 1) [30]. Ze względu na czas i precyzję wykonywania badania, tego typu diagnostyka wymaga zespołu operatorów, w szczególności jeżeli jest realizowana bez zamknięcia ruchu pociągów.

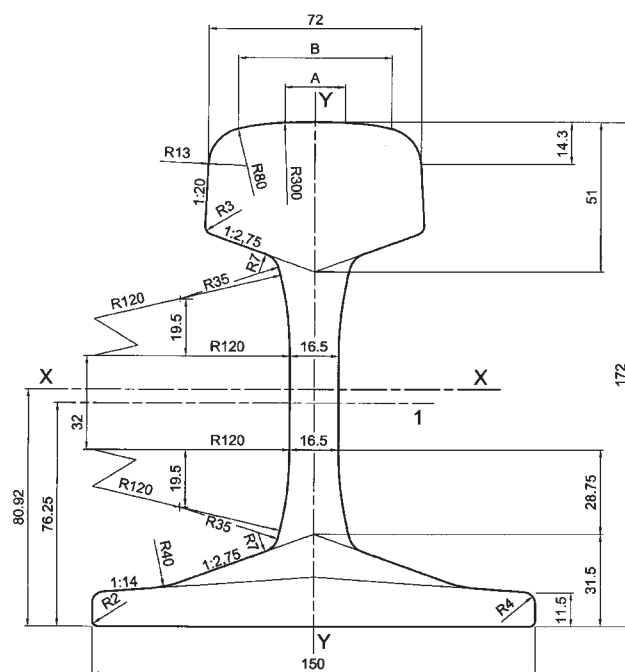


Rys. 1. Prowadzenie głowicy podczas badań UT szyn [30]

Metoda automatyczna stosowana na szlakach kolejowych w Polsce wymaga zastosowania defektoskopu wielokanałowego oraz głowic pojedynczych i podwójnych o różnych kątach emisji fal ultradźwiękowych w materiał szyny, zamontowanych w ślizgach pojazdu diagnostycznego. Badanie takie jest obecnie wykonywane z szybkością do 50 km/h (choć trwają prace nad zwiększeniem szybkości do 120 km/h) i tylko na powierzchni tocznej szyny.

Badania radiograficzne, które jako metoda objętościowa mogłyby dostarczyć cennych informacji

podczas diagnostyki szyn i złączy szynowych, nie są wykorzystywane w Polsce, choć w innych gałęziach przemysłu są bardzo rozpowszechnione i należą do badań podstawowych. Szynę kolejową, jako element o złożonym kształcie, zmiennej grubości i stosunkowo dużej powierzchni (patrz tabl. 1 i rys. 2), można zbadać szybciej metodą radiograficzną niż ultradźwiękową w szczególności korzystając z detektorów cyfrowych. W tym celu konieczne jest opracowanie wytycznych do prowadzenia tego rodzaju badań, gdyż zastosowanie promieniowania jonizującego wymaga specjalnych regulacji zarówno dla personelu badawczego, jak i samej organizacji badań.

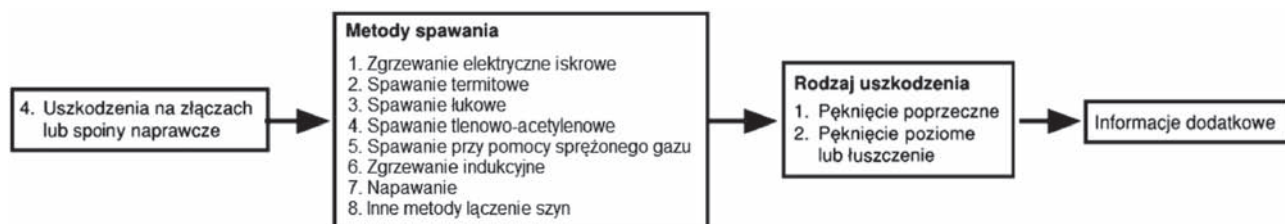


Rys. 2. Szyna kolejowa Vignole'a o profilu 60E1; wymiary podano w milimetrach [31]

### 3. Wady złączy szynowych a niezgodności spawalnicze – dokumenty odniesienia do tworzenia wytycznych przy ocenie jakości złączy szyn kolejowych

Schemat klasyfikacji uszkodzeń szyn zamieszczony w katalogu UIC 712 (2002) [32], IRS 70712 (2018) [33] przedstawia podział, według kodu liczbowego, gdzie pierwsza cyfra określa rodzaj i lokalizację wady:

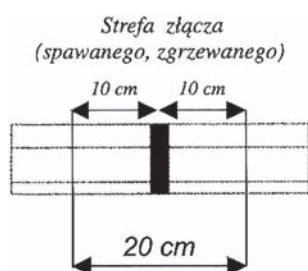
- wady końców szyn,
- wady poza końcami szyn,
- wady spowodowane uszkodzeniem szyn w procesie produkcji lub transportu,
- wady złączy spawanych i zgrzewanych, a także warstw napawanych.



Rys. 3. Schemat wad złączy szynowych; opracowanie własne na podstawie [32]

Wady złączy szynowych oznaczone cyfrą 4 klasyfikowane są jeszcze trzema kolejnymi cyframi według schematu (rys. 3).

Strefa złącza (spawanego, zgrzewanego) (rys. 4) obejmuje odległość 10 cm po obu stronach osi złącza. Każda wada, której początek znajduje się w tej strefie, klasyfikowana jest jako wada złącza [34].



Rys. 4. Strefa złącza szynowego [35]

Jednakże w odniesieniu do terminologii spawalniczej nie stosuje się pojęcia wady, lecz niezgodności niedopuszczalnej lub dopuszczalnej. Zgodnie z normą PN-EN ISO 6520-1 [8] niezgodności występujące w złączach spawanych klasyfikowane są niezależnie od zastosowanych materiałów na sześć grup:

- 1) pęknięcia – nieciągłości metalu spoiny lub strefy wpływu ciepła w postaci szczeliny powstałej w wyniku działania naprężeń,
- 2) pustki – przestrzenie wypełnione gazem,
- 3) wtrącenia stałe – obce ciała pozostałe w spoinie – żużło, topnik, obcy metal,
- 4) przyklejenia i braki przetopu – brak połączenia pomiędzy spoiną a materiałem rodzimym lub pomiędzy ściegami spoiny,
- 5) niezgodności kształtu i wymiarów – podtopienia, nadlewy, niewłaściwe brzożki spoiny, przesunięcia kątowe, wadliwa geometria złącza,
- 6) niezgodności spawalnicze różnorodnego rodzaju – inne niż w punktach 1–5, np.: ślady zajarzenia łuku, barwy nalotowe, pozostałości żużła lub topnika, przeszlifowanie.

Zgodnie z pierwszą częścią normy PN-EN ISO 6520-1 [8] oznaczenia grup 1–6 dotyczą procesów spawania łukowego wiązką elektronów oraz spawania laserowego. W drugiej części tej normy [9] dotyczącej zgrzewania, stosuje się oznaczenia grup 1–6 poprzedzone literą P. Kryteria akceptacji i wartości graniczne dla poszczególnych niezgodności spawalniczych podaje natomiast norma PN-EN ISO 5817 [7] w odniesieniu do poziomów jakości B, C, D (kolejno: wymagania ostre, średnie i łagodne). Przy ocenie niezgodności dokonywanej dowolną metodą nieniszczącą, technicy odnoszą się zazwyczaj do określonych wartości granicznych niezgodności dla konkretnej klasy jakości. W przypadku badań nieniszczących w polskim kolejnictwie, kryteria akceptacji są narzucone przez wytyczne PKP PLK S.A. [36–38]. W wytycznych [36, 37] poza wadami związanymi z prostoliniowością pionową i poziomą wyróżnia się wady w złączach szynowych w zależności od zastosowanej metody spawalniczej (tablica 2).

To zestawienie zawiera wybrane rodzaje wad odniesionych do niezgodności spawalniczych w nawiązaniu do starej normy EN 26520:1997, w której stosowano literowe oznaczenia niezgodności. W obecnej wersji normy [8, 9] stosuje się oznaczenia oparte na cyfrach. Implementacja radiografii do zastosowania na infrastrukturze PKP PLK stawia twórców nowych wytycznych, dotyczących kryteriów akceptacji wyników badań przed wyborem dokumentów odniesienia. Z jednej strony dostosowanie kryteriów akceptacji do normy PN-EN ISO 5817 [7] odnoszącej się do określonych poziomów jakości umożliwiłoby dostosowanie metody do wymagań uniwersalnych, a personel szkolący się w zakresie badań radiologicznych, po kursie posiadałby pełną wiedzę na temat zasad oceny jakościowej złącza. Z drugiej strony, główne zastosowanie mają wytyczne zarządcy infrastruktury, co ma uzasadnienie w specyfice metod spawalniczych stosowanych w łączeniu szyn i umożliwia zebranie potrzebnych wymagań w mniejszej liczbie dokumentów dostosowanych do potrzeb kolejnictwa. Zatem bardziej celowe może być dostosowanie oceny wyników badań radiologicznych do aktualnych wytycznych PKP PLK, co będzie wiązało się z opracowaniem instrukcji dla radiologicznych badań złączy szynowych

Tablica 2

## Zestawienie wybranych wad w złączach szynowych w oparciu o wytyczne PKP PLK [36, 37]

Wady złączy termitowych według Id-5 [36]	Wady złączy zgrzewanych iskrowo [37]
Wady wykonania	
Fa – wyciek (brak metalu) Fe – porowatość spoiny Db – brak wtopienia Fk – nadmierny nadlew Ba – żużel zwarty Bb – żużel pasmowy Bc – wtrącenia obcego metalu Bd – wtrącenia piaskowe	Db – brak przetopu Fk – nadmierna wypływka Bc – wtrącenia obcego metalu Sc – niewłaściwe oszlifowanie miejsc przylegania szczęk
Pęknięcia spoiny/zgrzeiny	
Ea – podłużne Eb – poprzeczne Ec – promieniowe	Ea – podłużne Eb – poprzeczne Ec – promieniowe
Wady obróbki	
Pt – powierzchni tocznej Pb – powierzchni bocznej Ns – nie oczyszczona spoina	Pt – powierzchni tocznej Pb – powierzchni bocznej Nw – nie obcięta wypływka

na wzór istniejących dla badań ultradźwiękowych oraz modyfikacji istniejących wytycznych dotyczących spawania termitem oraz zgrzewania szyn [36, 37] i innych dokumentów normatywnych.

#### 4. Bezpieczeństwo wykonywania badań radiologicznych

Podstawowym wyzwaniem, przy wdrażaniu metody radiograficznej do badania szyn kolejowych jest konieczność utworzenia procedur i instrukcji umożliwiających organizację tych badań w sposób bezpieczny dla operatorów i otoczenia. Wytyczne takie muszą uwzględnić zagrożenia, które w aspekcie technicznym obejmują następujące procedury wykonywania badań radiologicznych:

- wybór pomiędzy aparatem rentgenowskim lub gammagraficznym,
- ustalenie parametrów badania – czas ekspozycji, odległość źródło – obiekt, napięcie (natężenie) promieniowania,
- dobór odpowiedniej cyfrowej techniki detekcji – płytki luminoforowe lub panele płaskie,
- kolejność wykonywania czynności podczas przeprowadzanych badań.

Procedury oceny radiogramów i opracowania oraz dokumentowania wyników:

- znakowanie radiogramów oraz oznaczenie i identyfikacja spoin na radiogramach,
- kwalifikacje personelu (certyfikat według normy PN-EN ISO 9712: 2012 [39] przynajmniej

2 stopnia w badaniach radiograficznych oraz posiadanie upoważnienia do wykonywania badań),

- usytuowanie wskaźników jakości obrazu IQI (zgodnie z normą PN-EN ISO 17636-2 [1]),
- znormalizowany stosunek sygnału do szumu SNR [1],
- opracowanie metod dokumentacji interpretowanych wyników, np.: wzór protokołu z badania radiograficznego.

Procedury organizacyjne:

- zatrudnienie Inspektora Ochrony Radiologicznej [40],
  - czynności przygotowawcze: planowanie badań radiologicznych i system informowania otoczenia o prowadzeniu badań radiologicznych [41],
  - wymagania związane z zabezpieczeniem terenu: wyznaczenie i oznakowanie granicy terenu, na którym są prowadzone badania radiologiczne (opcja dzienna i nocna), stosowanie kolimatorów i ekranów ołowianych zabezpieczających przed promieniowaniem rozproszonym [41],
  - regulamin pracy z użyciem promieniowania X lub gamma,
  - instrukcja dotycząca transportu materiałów niebezpiecznych [42],
  - postępowanie w razie zaistnienia zdarzenia radiacyjnego [43],
  - procedury zakupu i przechowywania źródła promieniowania gamma oraz monitorowania jego przydatności do badań (czas połowicznego rozpadu),
  - procedury związane z zapewnieniem bezpieczeństwa osób przy wykonywaniu badań radiologicznych – stosowanie dozymetrów (dawkomierzy) [44].
- Wszystkie opisane zagrożenia należy bezwzględnie

wziąć pod uwagę przy tworzeniu warunków do wykonywania badań radiologicznych w torze, jak również należy wskazać przypadki i miejsca objęte całkowitym zakazem prowadzenia takich badań.

## 5. Możliwości przyspieszenia procesu diagnostycznego

Jedną z zalet badań radiograficznych, która stanowi pewną przewagę nad badaniami ultradźwiękowymi, jest możliwość stosunkowo dokładnego przebadania większego obszaru w krótszym czasie. Powierzchnia badania radiograficznego praktycznie jest ograniczona do wymiarów płyty detektora cyfrowego, podczas gdy przy badaniu ultradźwiękowym jest ograniczona do rozmiaru głowicy lub układu głowic. Zastosowanie tradycyjnej radiografii wykorzystującej błony fotograficzne wymaga obróbki fotochemicznej, co wydłuża czas potrzebny do otrzymania wyniku. Jednakże w obecnej rzeczywistości, w ofercie handlowej firm specjalistycznych, można znaleźć przenośne urządzenia radiograficzne z detektorami cyfrowymi i nie ma potrzeby stosowania błon fotograficznych [45, 46]. Na rysunku 5 przedstawiono urządzenie do badań gammagraficznych, umożliwiające uzyskanie zdjęcia w postaci cyfrowej, wygodnej dla operatora.

Zastosowanie paneli płaskich (radiografia DR, ang. – *Direct Digital Radiography*) ma przewagę nad badaniami wykorzystującymi płyty luminoforowe (radiografia CR, ang. *Computed Radiography*), które są stosunkowo drogie i wrażliwe na uszkodzenia. Przede wszystkim daje możliwość natychmiastowego obejrzenia wykonanego radiogramu i w razie potrzeby powtórzenia zdjęcia, jeśli nie spełnia wymagań jakościowych. Do uzyskania określonego wskaźnika SNR (ang. *Simplified Noise Level Reduction*) stosowane są

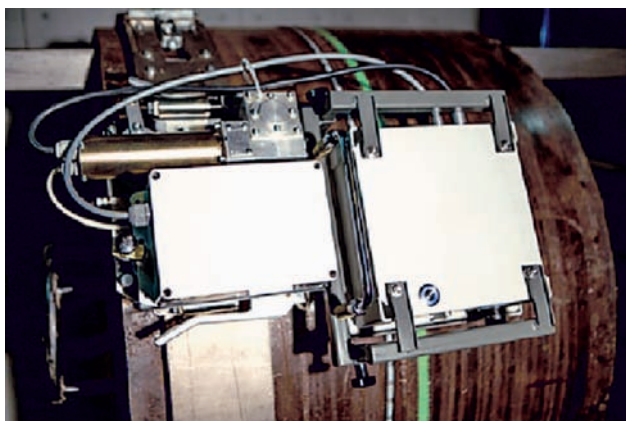
wielokrotnie krótsze czasy ekspozycji. Niestety panele płaskie mają też swoje ograniczenia, polegające np. na braku możliwości dopasowania panelu do krzywizny badanego elementu. Ponadto na rynku dostępne są różne rodzaje paneli płaskich, co oznacza, że nie mają one uniwersalnego zastosowania, lecz wymagają specjalnego doboru do wykonywanych badań. Prawidłowe wdrożenie radiografii DR będzie zatem wymagać dobrego przygotowania merytorycznego już na etapie zakupu detektora cyfrowego, gdzie istotne znaczenie ma nie tylko rozdzielczość i rozmiar matrycy, ale również rodzaj scyntyлятора, zakres energii promieniowania, czy maksymalna dawka skumulowana. Zagadnienia te ze szczegółami zostały przedstawione w publikacji [47]. Zastosowanie radiografii cyfrowej DR jest niewątpliwie najlepszym sposobem na skrócenie czasu badania i najbardziej optymalnym rozwiązaniem przy implementacji tej metody nieniszczącej do badań infrastruktury kolejowej.

Innym zagadnieniem jest rozważenie możliwości mechanizacji procesu. Najczęstsze zastosowania zmechanizowanej lub zautomatyzowanej metody radiograficznej w przemyśle obejmują tomografię komputerową. Mobilne tomografy komputerowe zostały opracowane z myślą o obiektach przemysłowych, takich jak m.in. mosty, rurociągi i samoloty, których ze względów wymiarowych nie można wnieść do laboratorium [48,49]. Rekonstrukcja tomograficzna umożliwia trójwymiarowe (3D) odwzorowanie struktury materiału i zawartych w nim wad, co można porównać z mikrografią.

W przemyśle stosowane są zmechanizowane rozwiązania do radiograficznego połowego badania spin obwodowych rurociągów (rys. 6). Podobne rozwiązania stosuje się przy metodzie ultradźwiękowej TOFT+PE [50]. Należy podkreślić, że w takich badaniach bardzo istotnym elementem jest ciągła weryfikacja nastaw systemów zmechanizowanych na próbkach odniesienia (zakres i czułość badania).



Rys. 5. Praca w rafinerii z przenośnym systemem do radiografii cyfrowej DR [45]



Rys. 6. Widok skanera wraz z detektorem DR prowadzonego na taśmie Crossa podczas badania złączy obwodowych [50]

Niezależnie od tego czy badanie będzie wykonywane w sposób zmechanizowany czy ręczny powstaje pytanie, w jakim stopniu będzie to możliwe w czasie przerw pomiędzy przejazdami pociągów. Sama organizacja badań, konieczność zabezpieczenia terenu i powiadomienia osób, które mogą znajdować się w pobliżu, o zagrożeniach związanych z realizacją badań wykorzystujących promieniowanie jonizujące zakłada, że badania radiologiczne muszą zostać starannie zaplanowane i objęte dużo większym reżimem niż badania ultradźwiękowe.

## 6. Podsumowanie

Prowadzenie badań radiograficznych wymaga wykształcenia kompetentnego personelu i przygotowania wielu regulacji, które zapewnią bezpieczeństwo pracy z promieniowaniem jonizującym zarówno specjalistom wykonującym te badania, jak i osobom, których obecność podczas badań jest konieczna. Dla infrastruktury PKP PLK nie ma wytycznych przewidujących zastosowanie tej metody badawczej do oceny złączy szyn kolejowych wykonanych metodami spawalniczymi. Jednocześnie w wielu gałęziach przemysłu radiografia jest często wykorzystywana jako metoda umożliwiająca otrzymanie cennych informacji o jakości badanego elementu oraz identyfikacji wad, które nie są wykrywane metodą ultradźwiękową. Biorąc pod uwagę możliwość opracowania specjalnego, dostosowanego do potrzeb kolei, mobilnego rozwiązania do badań radiograficznych spoin i zgrzezin szyn znajdujących się w torze, ogromnie pracochłonnym wyzwaniem będzie utworzenie procedur, instrukcji i innych wytycznych uwzględniających wszystkie aspekty pracy z promieniowaniem jonizującym.

## Literatura

1. PN-EN ISO 17637:2017-02: Badania nieniszczące złączy spawanych – Badania wizualne złączy spawanych.
2. PN-EN ISO 17638:2017: Badanie nieniszczące spoin – Badanie magnetyczno-proszkowe.
3. PN-EN ISO 3452-1:2021: Badania nieniszczące – Badania penetracyjne – Część 1: Zasady ogólne.
4. PN-EN ISO 17640:2019-01: Badania nieniszczące spoin – Badania ultradźwiękowe – Techniki, poziomy badania i ocena.
5. PN-EN ISO 17643:2015-11: Badanie nieniszczące spoin – Badanie prądami wirowymi spoin przez analizę płaszczyzny zespolonej.
6. PN-EN ISO 17636: 2022: Badanie nieniszczące spoin – Badania radiograficzne.
7. PN-EN ISO 5817:2014-05: Spawanie – Złącza spawane ze stali, niklu, tytanu i ich stopów (z wyjątkiem spawanych wiązką) – Poziomy jakości według niezgodności spawalniczych.
8. PN-EN ISO 6520-1:2009: Spawanie i procesy pokrewne. Klasyfikacja geometrycznych niezgodności spawalniczych w metalach. Część 1: Spawanie.
9. PN-EN ISO 6520-2:2013: Spawanie i procesy pokrewne. Klasyfikacja geometrycznych niezgodności spawalniczych w metalach. Część 2: Zgrzewanie.
10. Procedura dopuszczenia wykonawców prac spawalniczych na sieci kolejowej zarządzanej przez PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. Część 2: Złącza szynowe – zgrzewanie oporowe doczołowe z wyiskrzaniem ciągłym zgrzewarkami torowymi (P/IGSN-513-2/2016).
11. Procedura dopuszczenia wykonawców prac spawalniczych na sieci kolejowej zarządzanej przez PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. Część 3: Złącza szynowe – zgrzewanie iskrowe szyn w zgrzewalni P/IGSN-513-5/2018.
12. Procedura dopuszczenia wykonawców prac spawalniczych na sieci kolejowej zarządzanej przez PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. Część 4: Złącza szynowe – spawanie termitowe – wykonawstwo zewnętrzne (P/IGSN-513-1/2019).
13. Xiong L. et.al.: *Detection of Rail Defects Using NDT Methods*, Sensors 2023, 23, 4627. <https://doi.org/10.3390/s23104627>.
14. Gong W.: *Nondestructive Testing Technologies for Rail Inspection: A Review*, Coatings 2022, 12, 1790. <https://doi.org/10.3390/coatings12111790>.
15. Micic M. et.al.: *Inspection of RCF rail defects – Review of NDT methods*, Mechanical Systems and Signal Processing 182 (2023) 109568, <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2022.109568>.
16. Kabir S., Alsulami B.: *Assessment and Monitoring for Railway Tracks Reliability and Safety using Nondestructive Testing Measurement Systems*, International Journal of Railway Research, (2015), Vol.2, No1, pp. 24–32.
17. Papaalias M. et.al.: *The future of rail inspection technology and the INTERAIL FP7 project*, September 2012, 51st Annual Conference of the

- British Institute of Non-Destructive Testing 2012, NDT 2012. [https://www.bindt.org/downloads/ndt2012\\_2c3.pdf](https://www.bindt.org/downloads/ndt2012_2c3.pdf).
18. Tang R. et al.: *A literature review of Artificial Intelligence applications in railwaysystems*, Transportation Research Part C 140 (2022) 103679, <https://doi.org/10.1016/j.trc.2022.103679>.
  19. G. Jing et al. *Developments, challenges, and perspectives of railway inspection robots*, Automation in Construction 138 (2022) 104242 <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104242>.
  20. Ajmi C. et al.: *Deep Learning Technology for Weld Defects Classification Based on Transfer Learning and Activation Features*, Advances in Materials Science and Engineering Volume 2020, Article ID 1574350, 16 pages, <https://doi.org/10.1155/2020/1574350>.
  21. Nowak M., Bonek M.: *Porównanie radiologicznych i ultradźwiękowych metod badań nieniszczących w spawalnictwie*, Prace Instytutu Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Gliwice, 2017 Zeszyt 2.
  22. Witek M., Sobkiewicz D., Wocial A.: *Badania wycinka rury ze stali G355 z gazociągu po 15 letniej eksploatacji – cz.1: Badania metodami nieniszczącymi*, raport naukowo-badawczy 2002 <http://repo.pw.edu.pl/info/report/WUT1a4f9053cd144af19d-688f872a81b6eb/>.
  23. Brédif Ph. et al.: *Développement d'une méthode de contrôle des rechargements de rails*, NDT.net Issue: 2009-01, Cofrend – Congrès Toulouse 2008 (Cofrend 2008), <https://www.ndt.net/search/docs.php?id=7225>.
  24. Kah P. et al.: *Real Time Non-Destructive Testing Methods of Welding*, Advanced Materials Research Vol. 933 (2014) pp. 109–116 (2014), Trans Tech Publications, Switzerland, doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.933.109.
  25. Jung M.-j. et al.: *PAUT-based defect detection method for submarine pressure hulls*, International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering 10 (2018) 153e169, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2017.06.002>.
  26. Wirdelius H., Osterberg E.: *Study of Defect Characteristics Essential for NDT Testing Methods ET, UT and RT*, Technical Report, SKI Project Number 98267, October 2000, <https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/20143574>.
  27. Mackiewicz S.: *Ultradźwiękowe badania spoin austenitycznych*, XII Seminarium „Nieniszczące badania materiałów”, Zakopane, 2006.
  28. Instrukcja badań defektoskopowych szyn, spoin i zgrzein w torach kolejowych Id-10 (D-16) opracowanie PKP PLK S.A., 2005.
  29. Wytyczne ultradźwiękowych badań złączy szynowych zgrzewanych, Instrukcja Id-17 opracowanie PKP PLK S.A. 2005.
  30. Kowalczyk D., Antolik Ł., Mikłaszewicz I.: *Wady szyn kolejowych, a badania ultradźwiękowe*, Badania Nieniszczące i Diagnostyka, 2019, nr 4.
  31. PN-EN 13674-1: 2017: Kolejnictwo – Tor – Szyna Część 1: Szyny kolejowe Vignole'a o masie 46 kg/m i większej.
  32. UIC Code 712-R\_2002 Rail Defects.
  33. UIC 70712:2018-05 Rail Defects.
  34. Mastalerz M.: *Przegląd klasyfikacji niezgodności spawalniczych w branży kolejowej w odniesieniu do norm ISO*, prezentacja, Miedzeszryn, 2016.
  35. Makuch J.: *Diagnostyka szyn, wady w szynach* (prezentacja), Katedra Mostów i Kolei, Politechnika Wroclawska, Wrocław, 2015.
  36. Instrukcja spawania szyn termitem Id-5 2019 – PKP Polskie Linie Kolejowe S.A.
  37. Warunki techniczne wykonania i odbioru zgrzein w szynach kolejowych nowych łączonych zgrzewarkami stacjonarnymi. Wymagania i badania Id-112.
  38. Warunki techniczne wykonania i odbioru zregenerowanych przez napawanie łukowe elementów nawierzchni kolejowej Id-103.
  39. PN-EN ISO 9712:2022-09: Badania nieniszczące – Kwalifikacja i certyfikacja personelu badań nieniszczących.
  40. Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 5 marca 2021 r. w sprawie inspektorów ochrony radiologicznej. Tekst ogłoszony: D20210640.pdf.
  41. Ustawa z dnia 29 listopada 2000 r., Prawo atomowe i przepisy ogólne, Dz.U. 2023, poz. 18.
  42. Umowa europejska dotycząca międzynarodowego przewozu drogowego towarów niebezpiecznych (ADR). Genewa.1957.09.30. OŚWIADCZENIE RZĄDOWE z dnia 23 marca 2011 r. w sprawie wejścia w życie zmian do załączników A i B Umowy europejskiej dotyczącej międzynarodowego przewozu drogowego towarów niebezpiecznych (ADR), sporządzonej w Genewie dnia 30 września 1957 r.
  43. Postępowanie w przypadku zdarzeń radiacyjnych oraz w sytuacji narażenia istniejącego. Prawo atomowe, rozdział 11, Dz.U. 2023.1173.
  44. Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 23 grudnia 2002 r. w sprawie wymagań dotyczących sprzętu dozymetrycznego, Dz.U. 2002.239.2032.
  45. Pincu R., Kleinberger-Riedrich O.: *Advanced Digital Radiography for Field NDT*, International Symposium on Digital Industrial Radiology and Computed Tomography – We.2.3, <https://www.ndt.net/?id=11144> [dostęp z dnia 22.07.2023].
  46. Oferta handlowa firmy CASP System „Badania-Nieniszczące\_Casp-System-Sp.-z-o.o.\_aktualna oferta” <https://www.ndt24.pl/pl/rt-badania-radiograficzne> dostęp z dnia 22.07.2023.
  47. Mackiewicz S.: *Detektory promieniowania stosowane w cyfrowej radiografii bezpośredniej*,



- Badania Nieniszczące i Diagnostyka, 2017, nr 1–2, s. 44–51, DOI: 10.26357/BNiD.2017.025.
48. Ewert U.: *Current Developments in Digital Radiography and Computed Tomography from nm to Macro Scale*, 12th European Conference on Non-Destructive Testing, 2018.
49. Ewert U., Fuchs T.: *Progress in Digital Industrial Radiology Part II: Computed tomography (CT)*, Badania nieniszczące i diagnostyka, nr 1–2 (2017) s. 7–14.
50. Śliwowski M.: *Zwiększanie wiarygodności badania złączy spawanych rurociągów dla cyfrowych technik radiograficznych oraz ultradźwiękowych*, Badania nieniszczące i diagnostyka, nr 3 (2018), s. 56–65.

Artykuł opracowano w wyniku realizacji projektu badawczego o nr BRIK-II/0031/2022 „Mobilny system do radiograficznej kontroli szyn o profilu 60E1 lub E2 na liniach kolejowych PKP PLK” finansowanego ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju w ramach Wspólnego Przedsięwzięcia BRI.