

Badania i kontrola jakości złączy szynowych zgrzewanych

Małgorzata OSTROMĘCKA¹

Streszczenie

W artykule przedstawiono problematykę kontroli i zapewnienia jakości w spawalnictwie kolejowym. Opisano metodykę, wykonywanych w Instytucie Kolejnictwa na podstawie wymagań zawartych w normach PN-EN, badań kwalifikacyjnych zgrzewanych złączy szynowych. Scharakteryzowane rodzaje badań zgrzein, w tym: badania wizualne, pomiary geometryczne nierówności, badania magnetyczno-proszkowe i penetracyjne, próbę łamania, obserwacje mikro- i makrostruktury, pomiar twardości, badania wytrzymałości zmęczeniowej. Przedstawiono wymagania dla poszczególnych badań oraz warunki techniczne wykonywania zgrzein w torze.

Słowa kluczowe: złącza szynowe, badania kwalifikacyjne, zgrzewanie

1. Wprowadzenie

Według definicji normy PN-EN ISO 9001 [11], procesy specjalne muszą być monitorowane i nadzorowane w sposób ciągły w celu spełnienia określonych wymagań jakościowych. Dotyczy to w szczególności tych parametrów, których pomiary są kosztowne lub trudne do wykonania, a także parametrów wyrobu lub wyników procesu, które nie mogą być w pełni sprawdzone przez późniejsze kontrole i badania. Za taki proces uznano spawanie, a zagadnienia dotyczące jakości w przedsiębiorstwach stosujących procesy spawalnicze opisują normy PN-EN ISO 3834 [9, 12, 13]. Procesy specjalne powinny podlegać zatwierdzaniu i stałemu nadzorowi oraz być realizowane przez personel z odpowiednimi kwalifikacjami. Odnosi się to również do procesów spawalniczych, prowadzonych w torze bezстыkowy, które powinny być zatwierdzane zgodnie z ustanowionymi wymaganiami dokumentów normatywnych.

Obecnie w Polsce i w innych krajach europejskich na liniach kolejowych stosuje się tor bezстыkowy, który jest łatwiejszy w utrzymaniu oraz zapewnia większą spokojność jazdy w stosunku do toru klasycznego. Szyny toru bezстыkowego najczęściej pochodzą z polskich hut i mają długość 30, 75 i 120 metrów lub ze zgrzewalni (w tym przypadku ich długość dochodzi do 360 metrów). Tor bezстыkowy wymaga połączenia szyn w sposób trwały w odcinki kilku lub kilkunastokilometrowe. Proces łączenia szyn kolejowych stwarza wiele trudności technicznych i technologicznych,

co w znaczny sposób ogranicza liczbę metod spawalniczych możliwych do zastosowania, zasadniczo sprowadzając je do zgrzewania oporowego iskrowego oraz do spawania termitowego. Jako metodę alternatywną uznaje się jeszcze spawanie łukowe.

Podczas łączenia szyn istnieje wiele czynników, które mogą mieć niekorzystny wpływ na przebieg procesu i tym samym na wynik końcowy, jakim jest jakość wykonywanych połączeń. Z tego powodu, w celu zapewnienia odpowiedniej jakości i powtarzalności procesu, jest konieczne precyzyjne i powtarzalne sterowanie parametrami procesu oraz stałe ich monitorowanie, kontrola, analiza i ocena. W przypadku zgrzewania doczołowego szyn kolejowych, parametrami procesu są [2]:

- prędkość w fazie wyiskrzania i spęczania,
- naddatek na wyiskrzanie i spęczanie ΔS ,
- wartość prądu w fazie wyiskrzania i spęczania,
- siła docisku w fazie wyiskrzania i spęczania,
- długość wysunięcia elementów zgrzewanych ze szczęk Lz.

Dodatkowo należy uwzględnić parametry związane z obróbką cieplną po zgrzewaniu oraz z procesem usuwania wypłytki. Wszystkie parametry zgrzewania są wymienione w dokumentacji technicznej (WPS – *Welding Procedure Specification*), która jest dokumentem zakwalifikowanym według metody wymienionej w normie PN-EN ISO 15614 [6]. Metoda ta sprowadza się do wykonania i zbadania złącza próbnego.

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

2. Badania złączy szynowych zgrzewanych stacjonarnie w zgrzewalni

Doczołowe zgrzewanie szyn zgrzewarkami stacjonarnymi odbywa się w zgrzewalniach szyn. Kolejowe złącza szynowe podlegają badaniom kwalifikacyjnym, wykonywanym co pięć lat, zgodnie z wytycznymi zawartymi w normach oraz warunkami technicznymi wydanymi przez spółkę PKP PLK S.A. W normie PN-EN 14587-1 [4] opisano pięć następujących zagadnień:

- wymagania dotyczące procesu zgrzewania,
- procedury dopuszczenia dla zgrzewarek stacjonarnych w zgrzewalni,
- zatwierdzanie profili lub gatunków szyn,
- zatwierdzenie wykonawców robót,
- proces wykonywania zgrzein po zatwierdzeniu.

Wymagania zawarte w tej normie w pierwszej kolejności nakazują poddać wszystkie zgrzeiny starannym badaniom wizualnym. Obejmuje to identyfikację wszelkiego rodzaju wgłębień, pęknięć, uszkodzeń, niezgodności geometrycznych oraz śladów termicznych. Następnie mierzy się uskok w miejscu zgrzeiny pomiędzy łączonymi szynami, który nie powinien przekraczać wartości określonych w normie [4]. Kolejnym etapem jest określenie prostoliniowości poziomej i pionowej, które powinny spełniać wymagania określone w normie PN-EN 13674-1 [3]. Badanie magnetyczno-proszkowe lub penetracyjne służy do wykrywania niezgodności spawalniczych wychodzących na powierzchnię (rys. 1). Wszystkie zgrzeiny zostają poddane badaniom magnetyczno-proszkowym zgodnie z normą PN-EN ISO 17638 [7] lub penetracyjnym zgodnie z normą PN-EN ISO 3452-1 [8]. Badany obszar powinien być wolny od wskazań. W przypadku ujawnienia pęknięcia, proces spawania należy uznać za niespełniający kryteriów akceptacji.



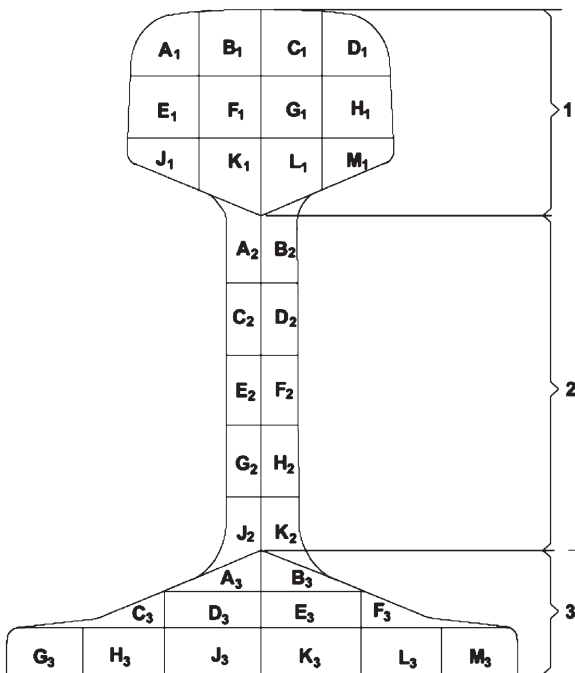
Rys. 1. Komplet dziesięciu próbek szyn ze zgrzeinami po badaniach geometrycznych oraz magnetyczno-proszkowych [fot. M. Ostromięcka]

Kolejnym etapem badania złączy szynowych jest próba łamania, wykonywana dla pięciu zgrzein, które pomyślnie przeszły wcześniej opisane badania. Każda z prób łamania trwa do momentu złamania lub zostaje zakończona po osiągnięciu limitu siły nacisku, pod warunkiem, że zostały osiągnięte wartości przedstawione w tabelicy 1. Jeżeli dojdzie do pęknięcia, należy sprawdzić powierzchnie pęknięcia, a szczegóły każdej niezgodności zgrzeiny powinny zostać zarejestrowane w postaci osobnego zapisu na siatce profilu szyny pokazanej na rysunku 2.

Tablica 1

Warunki wykonania próby łamania według normy PN-EN 14587-1 [4]

| Profil szyny | Minimalna strzałka ugięcia dla różnych gatunków stali szynowej [mm] | | | Minimalna siła łamiąca [kN] | |
|--------------|---|-------------------------|------------------|-----------------------------|---|
| | R220, R260, R260Mn | R320Cr, R350HT, R350LHT | R370CrHT, R400HT | R220 | R260, R260Mn, R320Cr, R350HT, R350LHT, R370CrHT, R400Ht |
| 60E1/E2 | 20 | 20 | 15 | 1500 | 1600 |
| 56E1 | | | | 1230 | 1330 |
| 55E1 | | | | 1200 | 1300 |
| 54E1 | 25 | 22 | 15 | 1230 | 1330 |
| 54E2 | | | | 1170 | 1270 |
| 54E3/E4 | | | | 1080 | 1180 |
| 52E1 | | | | 1100 | 1200 |
| 50E6 | | | | 1070 | 1170 |
| 50E3 | | | | 1060 | 1160 |
| 49E1/E5 | 30 | 25 | 15 | 950 | 1050 |
| 46E1 | | | | 910 | 1010 |
| 46E2 | | | | 930 | 1030 |



Rys. 2. Siatka profilu szyny do opisu zidentyfikowanych niezgodności:
1) główka, 2) szyjka, 3) stopka [4]

Zapis powinien zawierać następujące szczegóły, dotyczące każdej niezgodności:

- wymiary: szerokość i długość,
- kształt,
- lokalizacja,
- orientacja,
- źródło złamania,
- rodzaj niezgodności.

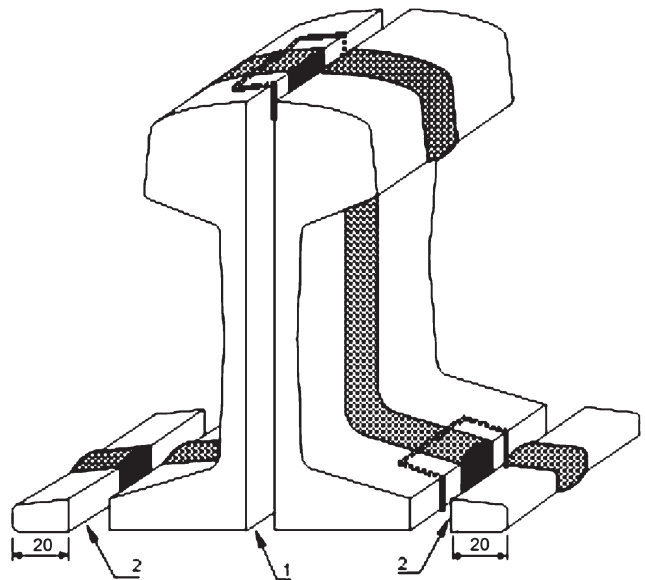
W tabelicy 1 przedstawiono warunki wykonania próby łamania: minimalną strzałkę ugięcia i siłę łamiącą w zależności od profilu i gatunku stali szynowej według normy PN-EN 14587-1 [4].

Obserwacje makrostruktury należy przeprowadzić po wytrawieniu próbki odczynnikiem Fry², który ujawnia odkształcenia plastyczne w stalach węglowych. Badanie makroskopowe wykonuje się dla czterech zgrzein, które należy podzielić na sekcje, jak pokazano na rysunku 3. Powinny one spełniać następujące wymagania:

1. Widoczna strefa wpływu ciepła powinna mieć nominalnie symetryczny kształt wokół linii zgrzewania i mieścić się w zakresie 45 mm (W_{max}) i 20 mm (W_{min}). Dopuszczalne odchylenie między maksymalnymi i minimalnymi wymiarami dowolnej z czterech zgrzein nie może przekraczać 20 mm. Wymóg ten w równym stopniu dotyczy cięć w osi pionowej na całej głębokości szyny i każdej końcówce stopki szyny, a wyniki muszą być nie-

zależnie ocenione. W przypadku stali gatunku R320Cr szerokość HAZ określa zleceniodawca.

2. Niedopuszczalne są braki przetopu, obecność wtrąceń, pęknięć, skurczów lub przyklejeń. Niedoskonałości, które nie mogą być jednoznacznie zidentyfikowane podczas badania makrostruktury, należy sprawdzić na poziomie mikrostrukturalnym.
3. Przyklejenia są akceptowane na linii zgrzewania pod warunkiem, że spełniają następujące wymagania:
 - maksymalnie dopuszcza się dwa przyklejenia o wymiarze pionowym 10 mm i maksymalnej grubości 1 mm, gdy przyklejenie wydaje się pogrubiać linię zgrzeiny i nie ma soczewkowego wyglądu;
 - maksymalnie dopuszcza się cztery przyklejenia o wymiarze pionowym 10 mm i maksymalnej grubości 1 mm, gdy przyklejenie ma charakter soczewkowy.
4. Nie obserwuje się kruchości spowodowanej procesem zgrzewania, chłodzenia lub wykończenia złącza.



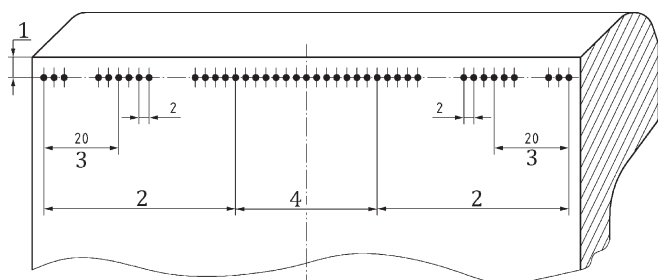
Rys. 3. Schemat pobierania próbek do badań makroskopowych [4]

Po zakończeniu badania makrostruktury należy przeprowadzić badanie mikrostruktury na dwóch zgrzeinach. Podczas badania przeprowadzonego przy powiększeniu $\times 100$, w strukturze nie powinno się identyfikować obecności martenzytu ani bainitu w widocznej strefie wpływu ciepła. Po wykonaniu badań makro- i mikrostrukturalnych, kolejnym etapem jest zbadanie twardości, którą przeprowadza się na dwóch z czterech pionowych przekrojów wzdłużnych szyn o pełnej głębokości (rys. 4). Obszar objęty badaniem powinien rozciągać się na długości co najmniej 80 mm z każdej strony zgrzeiny i być pobrany z pionowego przekroju podłużnego względem osi pionowej główki szyny. Celem po-

² Fry – odczynnik stosowany do badań makroskopowych próbek stali węglowej, ujawniający miejsca, w których została przekroczona granica plastyczności, roztwór CuCl_2 w HCl .

miaru jest określenie zmiany twardości w zgrzeinie i w strefie wpływu ciepła po obu stronach zgrzeiny. Zgodnie z normą PN-EN ISO 6507-1 [11] do badania wykorzystuje się metodę Vickersa z zastosowaniem następujących parametrów:

- Twardość w skali Vickersa – HV 30;
- Odciski powinny znajdować się na linii między 3 mm i 5 mm poniżej powierzchni toczonej na pionowej wzdłużnej osi szyny. Odstęp między kolejnymi odciskami powinien wynosić 2 mm, w konfiguracji jak pokazano na rysunku 4;
- Obszar pomiaru twardości powinien rozciągać się następująco:
 - dla stali gatunków R220, R260 i R260Mn, R320Cr, symetrycznie, uwzględniając obie strony zgrzeiny, od środka zgrzeiny przez strefę wpływu ciepła przynajmniej 20 mm w głąb niezmiennego materiału rodzimego szyny;
 - dla stali gatunków R350HT, R350LHT, R370CrHT i R400HT, wyniki pomiarów pobranych w odległości 8 mm od linii wtopienia, powinny zawierać się w granicach wyznaczonych w normie.

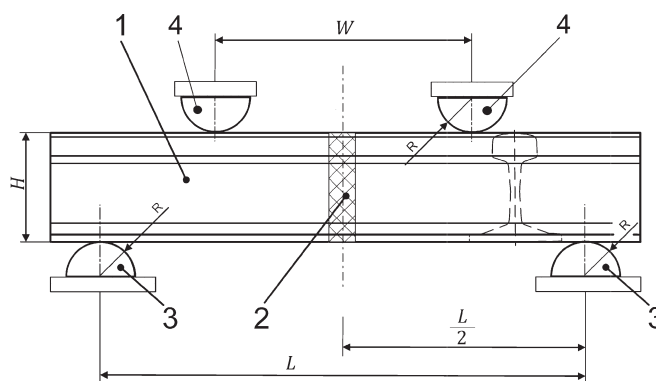


Rys. 4. Schemat realizowania próby twardości dla zgrzeiny doczołowej szyny kolejowej: 1) głębokość między 3 mm a 5 mm, 2) materiał szyny poza widoczną zgrzeiną i strefą wpływu ciepła, 3) materiał rodzimy szyny o niezmiennionej strukturze, 4) obszar zgrzeiny i strefy wpływu ciepła ujawniony makrograficznie [4]

Jeżeli badanie wytrzymałości zmęczeniowej jest wymagane przez zleceniodawcę, badanie przeprowadza się zgodnie z wymaganiem, metodą *staircase*³, przy której należy wykonać dziesięć złączy lub metodą *past-the-post*, do której potrzeba trzech złączy. Czteropunktowy schemat próby zmęczeniowej (rys. 5) zakłada dwupunktową siłę nacisku o minimalnej odległości pomiędzy punktami 150 mm i określony rozstaw podpór.

W Laboratorium Badań Materiałów i Elementów Konstrukcji Instytutu Kolejnictwa często przeprowadza się próbę zmęczeniową metodą *past-the-post*. Siłę nacisku oraz sprawdzenie liniowości obciążenia wyznacza się za pomocą mostka Wheatstone'a, który składa się z tensometru naklejonego na litą szynę oraz na oddzielną część szy-

ny (rys. 6). W zależności od gatunku stali próbki obciąża się siłą 210–220 kN w celu wywołania np. w stopce szyny typu 60E1 naprężenia 190 MPa. Jeśli po 5 milionach cykli próbka do badań zmęczeniowych złącza zgrzewanego nie wykaże śladów rozwarstwienia i pęknięć, zgodnie z obowiązującymi normami kwalifikuje się ją z wynikiem pozytywnym [1].



Rys. 5. Czteropunktowy schemat próby zmęczeniowej według normy [4]: 1) szyna, 2) zgrzeina, 3) podpory, 4) miejsca przyłożenia siły

3. Złącza szynowe zgrzewane w torach

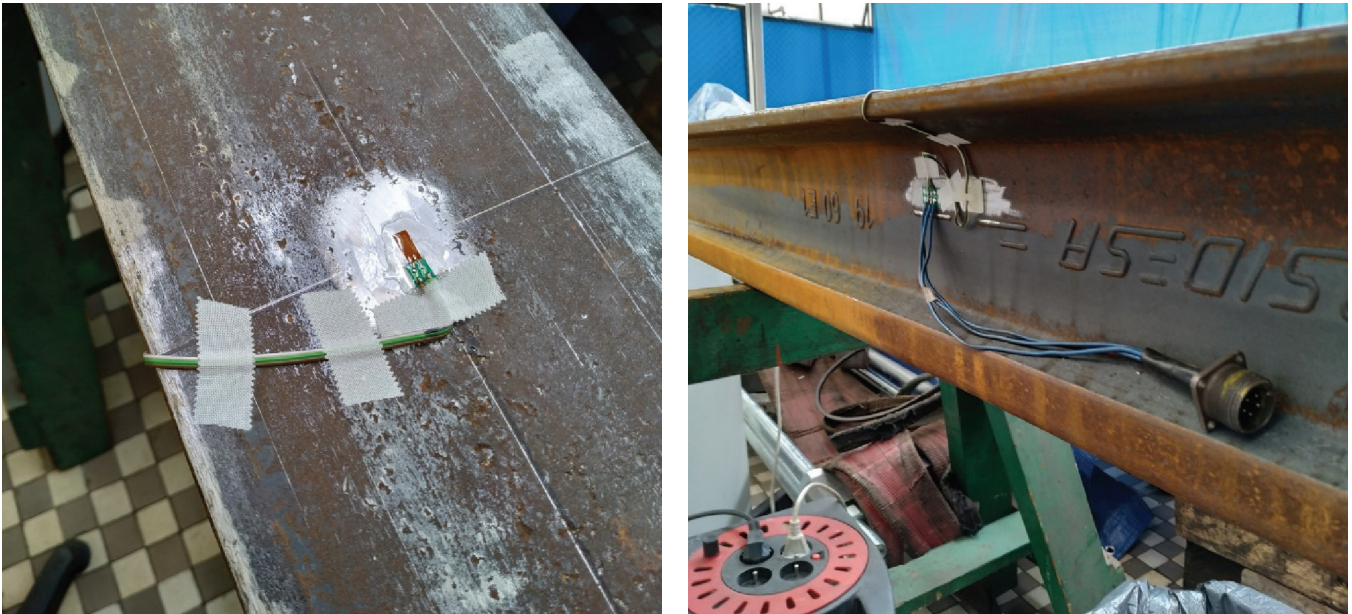
Podczas doczołowego, iskrowego zgrzewania szyn w torach stosuje się zgrzewarki typu ZMZI lub zgrzewarki mobilne dwudrogowe, zazwyczaj umieszczone na samochodach. Proces zgrzewania, wykonywany zgrzewarkami mobilnymi powinien być prowadzony za pomocą zaprogramowanego urządzenia automatycznego. Zadane parametry procesu zgrzewania powinny odpowiadać parametrom ustalonym podczas kwalifikowania procesu zgrzewania, a wykonane złącza spełniać wymagania jakościowe zgodne z normą PN-EN 14587-2 [5]. Zgrzewarka powinna umożliwiać kontrolę następujących parametrów:

- program identyfikacji i szczegóły ustawień,
- prąd zgrzewania,
- siła lub nacisk spęczania,
- przemieszczenie szyny (skrócenie),
- czas zgrzewania.

Wymienione parametry zgrzewania powinny być kontrolowane i zapisywane dla każdej wykonanej zgrzeiny. Powinny również umożliwiać wykonanie zgrzeiny bez zmiany programu zgrzewania, przy temperaturze -10°C i wyższej. Zmiany parametrów podgrzewania w zależności od temperatury szyny, nie traktuje się jako zmianę programu zgrzewania.

Wykonane złącza powinny spełniać wymagania jakościowe zgodne z normą PN-EN 14587-2 [5], a zatem mieć

³ Metoda *staircase* (metoda schodkowa): procedura dokładnego wyznaczania granicy zmęczenia materiałów metalowych, polegająca na badaniu dużej liczby próbek ze stałym obciążeniem, stałą częstotliwością obciążenia, w jednakowej temperaturze; gdy próbka pęknie, to dla następnej próbki obciążenie zmniejsza się, jeżeli nie pęknie – obciążenie zwiększa się.



Rys. 6. Przygotowanie do badania zmęczeniowego złącza zgrzewanego [fot. M. Ostromięcka]

właściwy układ geometryczny po szlifowaniu, określony przez prostoliniowość poziomą i pionową, twardość, odporność na zginanie, odpowiednią makro- i mikrostrukturę oraz wytrzymałość zmęczeniową. Norma PN-EN 14587-2 [5] zawiera trzy główne zagadnienia:

- procedurę dopuszczenia zgrzewarek mobilnych do zgrzewania iskrowego szyn (ZMZI),
- zatwierdzenie wykonawców robót,
- wykonywanie zgrzein.

Metodyka badawcza, stosowana przy ocenie jakości wykonywanych złączy, jest analogiczna do metodyki przedstawionej w normie, dotyczącej szyn ze zgrzewalni. Dla szyn zgrzewanych poza zgrzewalnią, złagodzone pewne wymagania. Przyczyną tego jest dyrektywa europejska, dotycząca zapewnienia swobody otwartego rynku europejskiego. Zagadnienie to w znacznie wyższym stopniu dotyczy procesów prowadzonych przy użyciu zgrzewarek mobilnych, gdyż wykorzystuje się je w różnych miejscach (również poza Polską) i warunki ich pracy mogą różnić się w zakresie regulacji prawnych i zasilania energią elektryczną. Zatem z tych powodów minimalne wymagania dotyczące próby łamania w zakresie produkcyjnych prób łamania, jak również maksymalnej dopuszczalnej wysokości wypłytki po przycięciu, są łagodniejsze niż dla szyn zgrzewanych w zgrzewalni.

4. Podsumowanie

W procesach spawalniczych najtrudniej jest osiągnąć powtarzalność jakości wyrobu, choć w przypadku procesów zmechanizowanych lub zautomatyzowanych jest ona

znacznie wyższa niż w realizowanych ręcznie. Do takich procesów, w których udział czynnika ludzkiego jest zminimalizowany, należą właśnie procesy zgrzewania szyn.

Zagadnienie jakości w realizacji procesów spawalniczych podczas wykonywania złączy szynowych ma podstawowe znaczenie dla minimalizacji uszkodzeń nawierzchni kolejowej, a zatem zapewnienia bezpieczeństwa pasażerów. Na zagadnienie zapewnienia jakości zgrzewanych połączeń szyn kolejowych można spojrzeć od strony parametrów technologicznych procesu i zasadniczo ten aspekt powinna wyczerpywać zakwalifikowana karta technologiczna zgrzewania (WPS). Jednakże najlepiej zaprojektowany proces nie zawsze gwarantuje prawidłowość jego realizacji. Z tego właśnie powodu konieczna jest kontrola realizacji parametrów procesu dla każdej wykonywanej zgrzeiny.

Warto nadmienić, że aktualne dane literaturowe [2] wskazują, że kontrola procesu zgrzewania rezystancyjnego z pomiarem prądu bez pomiaru napięcia zgrzewania (czego przedmiotowe normy nie przewidują) nie jest wystarczająca, gdyż najistotniejsze z punktu widzenia kontroli jakości zgrzewania są przebiegi energii dostarczonej do zgrzeiny i skrócenia elementów zgrzewanych. Zatem z punktu widzenia oceny jakości procesu zgrzewania, konieczny jest zarówno pomiar natężenia, jak i napięcia prądu w celu wyznaczenia dodatkowych wielkości charakterystycznych i pochodnych tych parametrów takich jak rezystancja, moc i energia.

Laboratoryjne badania złączy szynowych potwierdzają dobrą jakość wykonywanych złączy szynowych, zarówno pochodzących ze zgrzewalni, jak i wykonywanych w torze. Coraz rzadsze uszkodzenia toru w miejscach nowych połączeń zgrzewanych są dowodem na to, że metodyka laboratoryjnych badań kwalifikacyjnych jest prawidłowa i spełnia swoje zadanie.

Bibliografia

1. Mikłaszewicz I.: *Wykonywanie i badanie złączy szynowych*, Problemy Kolejnictwa, 2013, z. 158.
2. Mikno Z., Szebeszczyk T., Czyłok K.: *Kontrola jakości procesu zgrzewania rezystancyjnego doczołowego iskrowego*, Przegląd Spawalnictwa, 2015, Vol. 87, nr 8.
3. PN-EN 13674-1:2011+A1:2017: Kolejnictwo – Tor – Szyna – Część 1: Szyny kolejowe Vignole’a o masie 46 kg/m i większej.
4. PN-EN 14587-1: 2019: Kolejnictwo – Infrastruktura – Zgrzewanie iskrowe nowych szyn – Część 1: Zgrzewanie szyn ze stali gatunku R220, R260, R260Mn, R320Cr, R350HT, R350LHT, R370CrHT oraz R400HT w zgrzewalni.
5. PN-EN 14587-2: 2009: Kolejnictwo – Tor – Zgrzewanie iskrowe szyn – Część 2: Zgrzewanie nowych szyn ze stali gatunku R220, R260, R260Mn i R350HT zgrzewarkami torowymi poza zgrzewalnią.
6. PN-EN ISO 15614-13:2012: Specyfikacja i kwalifikowanie technologii spawania metali – Badanie technologii spawania – Część 13: Zgrzewanie rezystancyjne doczołowe (zwarciowe) i iskrowe.
7. PN-EN ISO 17638:2017: Badanie nieniszczące spoin – Badanie magnetyczno-proszkowe.
8. PN-EN ISO 3452-1:2013: Badania nieniszczące – Badania penetracyjne – Część 1: Zasady ogólne.
9. PN-EN ISO 3834:2007: Wymagania jakości dotyczące spawania materiałów metalowych.
10. PN-EN ISO 6507-1:2018: Metale – Pomiar twardości sposobem Vickersa – Część 1: Metoda badania.
11. PN-EN ISO 9001:2015-10: Systemy zarządzania jakością – Wymagania.
12. Sałaciński T., Sosnowski W.: *System nadzorowania jakości procesów spawalniczych zgodny z wymaganiami ISO 3834 w oparciu o standardy ISO 9001 – część 1*, Przegląd Spawalnictwa, 2015, Vol. 87, nr 4.
13. Sałaciński T., Sosnowski W.: *System nadzorowania jakości procesów spawalniczych zgodny z wymaganiami ISO 3834 w oparciu o standardy ISO 9001 – część 2*, Przegląd Spawalnictwa, 2015, Vol. 87, nr 6.