

Wybrane właściwości zgrzewanych złączy szyn kolejowych wykonanych ze stali R260 i R350HT

Małgorzata OSTROMĘCKA¹

Streszczenie

Artykuł przedstawia wyniki badań zgrzewanych złączy szyn kolejowych o profilu 60E1, wykonanych ze stali R260 i R350HT metodą zgrzewania oporowego iskrowego. Badania obejmowały analizę makro- i mikrostrukturalną, rozkład twardości HV30 w obszarze materiału rodzimego, strefy wpływu ciepła oraz linii zgrzeiny. Wyniki wskazują na prawidłowy przebieg zgrzewania, brak wad oraz zgodność właściwości mechanicznych z wymaganiami norm przy wyższej twardości złączy wykonanych ze stali R350HT.

Słowa kluczowe: złącza zgrzewane szyn, badania mikroskopowe i makroskopowe, rozkład twardości

1. Wstęp

Trwałość i niezawodność połączeń szynowych stanowi jeden z kluczowych czynników wpływających na bezpieczeństwo oraz efektywność eksploatacji infrastruktury kolejowej. Złącza kolejowe szyn są punktami toru, w których kumulują się naprężenia eksploatacyjne oraz zjawiska degradacyjne związane z oddziaływaniem obciążeń dynamicznych. Właściwa ocena ich jakości, obejmująca zarówno analizę strukturalną, jak i mechaniczną, ma istotne znaczenie zarówno w aspekcie naukowym, jak i praktycznym [1, 10, 13, 19].

Od wielu lat obserwuje się zainteresowanie rynku kolejowego stalami szynowymi z gatunku R260 oraz R350HT. Stal R260 jest powszechnie stosowanym gatunkiem, zapewniającym zrównoważone parametry wytrzymałościowe i dobrą spawalność. Stal R350HT, poddawana procesowi obróbki cieplnej w obszarze główki, charakteryzuje się wyższą twardością i odpornością na zużycie, co predysponuje ją do zastosowań w warunkach intensywnego obciążenia ruchem kolejowym. Wprowadzenie tego gatunku do praktyki eksploatacyjnej wymaga jednak szczegółowej analizy jakości złączy zgrzewanych, ze względu na możliwość występowania niejednorodności strukturalnych oraz zmian właściwości mechanicznych w strefach połączenia.

Celem artykułu jest porównanie właściwości złączy szynowych wykonanych ze stali R260 i R350HT. Analizie poddano makrostrukturę, mikrostrukturę

oraz rozkład twardości w poszczególnych strefach złączy. Wyniki badań umożliwiają określenie wpływu gatunku stali na jakość połączeń oraz mogą stanowić podstawę do dalszej optymalizacji procesów zgrzewania stosowanych w budowie i modernizacji infrastruktury kolejowej.

2. Przedmiot badań

Przedmiotem badań były złącza zgrzewane szyn kolejowych o profilu 60E1, wykonanych ze stali gatunku R260 oraz R350HT. Gatunki te należą do grupy stali stosowanych w torach kolejowych o wysokiej wytrzymałości i odporności na zużycie eksploatacyjne. Stal R260 charakteryzuje się zawartością węgla na poziomie około 0,6% oraz strukturą perlityczną, zapewniającą korzystny kompromis pomiędzy wytrzymałością a ciągliwością. Jest to stal stosowana powszechnie w torach standardowych, w warunkach umiarkowanego obciążenia dynamicznego.

Stal R350HT jest poddawana dodatkowej obróbce cieplnej główki szyny w celu uzyskania zwiększonej twardości i odporności na zużycie ściernie. Materiał ten jest przeznaczony głównie na tory o dużym natężeniu ruchu oraz w rejonach szczególnie narażonych na oddziaływania dynamiczne, takich jak łuki o małych promieniach czy odcinki przed rozjazdami. Skład chemiczny badanych gatunków stali był zgodny z wytycznymi podanymi w tablicy 1.

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

Tablica 1

Skład chemiczny stali szynowych R260 oraz R350HT dla próby stałej zgodnie z Id-106 [5]

Gatunek stali	Skład chemiczny										10–4% [ppm]	R _m min [MPa]	A5 min [%]	HBW Twardość na pow. tocznej
	C	Si	Mn	P max	S max	Cr	Al max	V max	N max	H max	O max			
R260	0,60–0,82	0,13–0,60	0,65–1,25	0,030	0,030	≤ 0,15	0,004	0,030	0,010	2,5	20	880	10	260–300
R350HT	0,70–0,82	0,13–0,60	0,65–1,25	0,025	0,030	≤ 0,15	0,004	0,030	0,010	2,5	20	1175	9	350–390

Badane złącza wykonano metodą zgrzewania oporowego iskrowego w warunkach przemysłowych, w stacjonarnej zgrzewalni szyn. Proces ten polega na nagrzewaniu końców szyn prądem elektrycznym do temperatury plastyczności oraz ich następnym dociśnięciu, co prowadzi do powstania trwałego połączenia metalurgicznego. Obecnie jest to jedna z najpowszechniej stosowanych technologii łączenia szyn kolejowych, gwarantująca wysoką jakość i jednorodność połączeń.

Zasadniczą różnicą w technologii zgrzewania tych dwóch gatunków stali szynowej jest zastosowanie dla stali R350HT większej liczby impulsów prądowych oraz wymuszonego chłodzenia pod koniec procesu. Ta operacja jest przeprowadzana po automatycznym usunięciu wypływu w zakresie temperatur 800–500°C i trwa około 70–80 sekund. Przykładowe parametry technologiczne wykonanych złączy przedstawiają rysunki 1 i 2.

Kolejowe złącza szynowe są poddawane badaniom kwalifikacyjnym zgodnie z wytycznymi zawartymi w Warunkach Technicznych Id-112: 2013, wydanych przez PKP PLK [6] oraz w normie PN-EN 14587-1: 2019 [16] i są wykonywane co pięć lat. Wytyczne były również kryterium oceny jakościowej badanych złączy.

Badane próbki złączy poddano badaniom makroskopowym, mikroskopowym oraz badaniom twardości na podstawie wytycznych podanych w warunkach technicznych Id-112: 2013 [6] oraz w normie PN-EN 14587-1: 2019 [16].

3. Metodyka badań makro- i mikrostrukturalnych oraz badań twardości HV30

Badania obejmowały analizę makrostruktury, mikrostruktury oraz pomiary twardości metodą Vickersa. Zastosowane procedury umożliwiły ocenę jakości połączeń, identyfikację charakterystycznych stref złącza oraz określenie rozkładu właściwości mechanicznych w badanym obszarze.

Badanie makrostruktury zgrzein szyn przeprowadzono zgodnie z PN-EN 14587-1:2019-03 na próbnym złączach metodą głębokiego trawienia zgodnie z normą PN-57/H-04501. Badania przeprowadzono na powierzchni złączy przeciętych wzdłuż linii centralnej szyny. Powierzchnię złączy szlifowano i trawiono odczynnikami Fry ($\text{CuCl}_2 + \text{HCl} + \text{H}_2\text{O}$). Analiza makrostrukturalna umożliwiła wyraźne zidentyfikowanie linii zgrzeiny, strefy wpływu ciepła (SWC), strefy plastycznego odkształcenia (linii płynięcia) oraz ocenę jakości połączenia pod względem obecności wad, takich jak pęknięcia, porowatości czy wtrącenia.

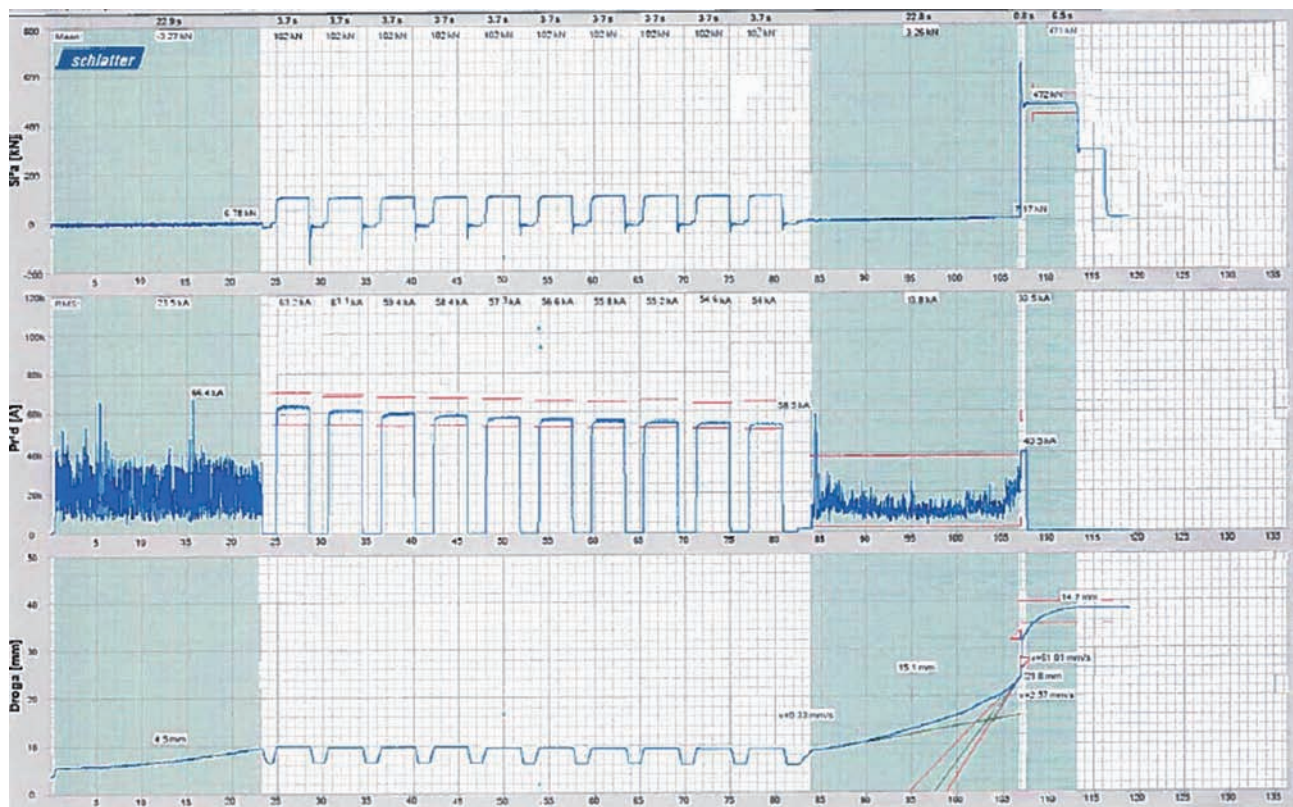
Do badań mikrostrukturalnych przygotowano zgłady pobrane zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 14587-1:2019-03 z obszaru obejmującego linię zgrzewania oraz strefę wpływu ciepła, z główki oraz stopki złączy. Przygotowanie próbek obejmowało szlifowanie, polerowanie oraz końcowe polerowanie zawiesziną diamentową (1 μm). Struktury ujawniono przez trawienie nitalem o stężeniu 4%. Obserwacje wykonano mikroskopem metalograficznym firmy KEYENCE VHX-900F przy powiększeniach $\times 100$, $\times 500$ i $\times 1000$. Badania umożliwiły identyfikację składników mikrostruktury oraz ocenę wad powstałych w procesie zgrzewania.

Pomiary twardości wykonano metodą Vickersa zgodnie z normą PN-EN ISO 6507 [9]. Zastosowano obciążenie 294,2 N (HV30). Pomiary wykonywano na złączu przeciętym wzdłuż osi centralnej szyny (w odległości 5 mm od powierzchni tocznej), wykonując odciski twardości w odległości co 2 mm. Obejmowały one materiał rodzimy, strefę wpływu ciepła oraz linię zgrzewania. Analiza rozkładu twardości umożliwiła określenie wpływu gatunku stali oraz procesu zgrzewania na właściwości mechaniczne złączy.

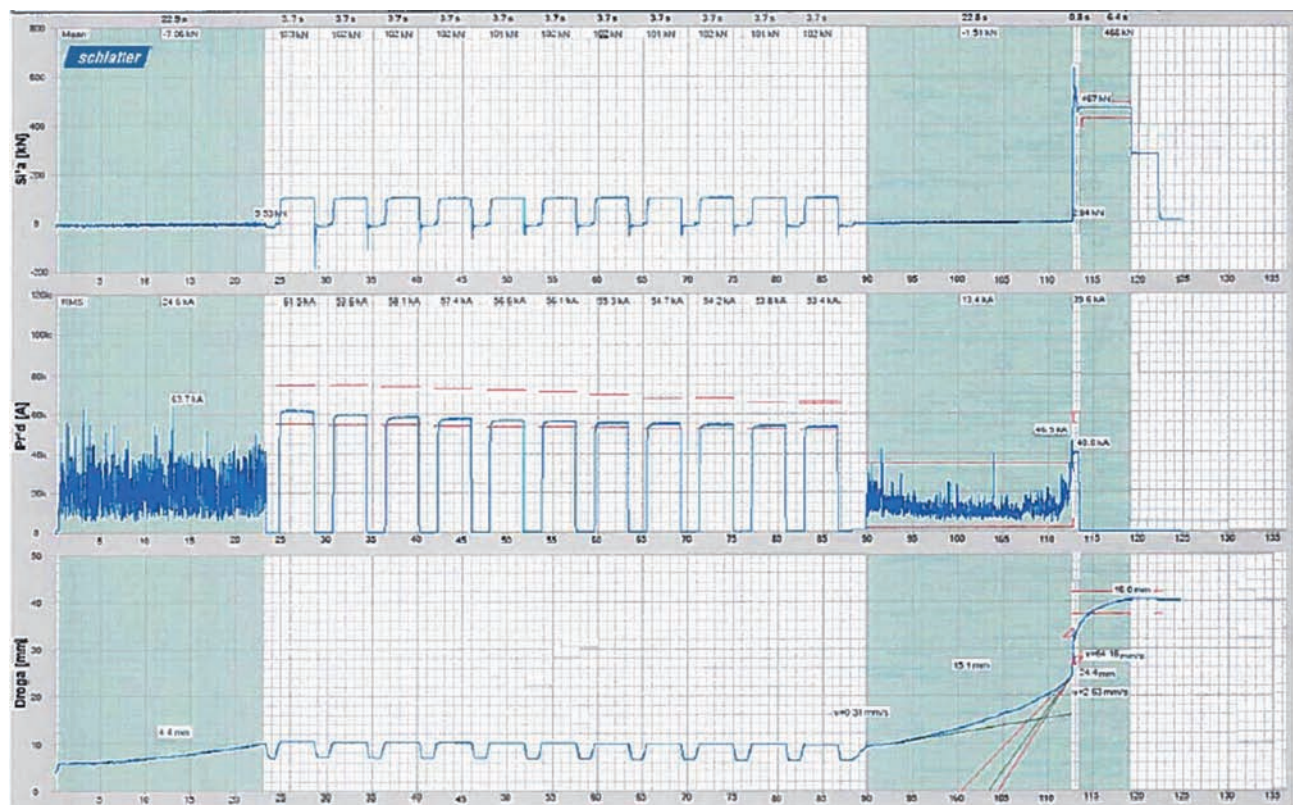
4. Wyniki badań

4.1. Badania makroskopowe

Makrostruktura kolejowego złącza szyn zgrzewanego metodą iskrową ma charakterystyczny układ



Rys. 1. Wykres zgrzewania dla szyn o profilu 60E1 wykonanych ze stali R260 [opracowanie własne]



Rys. 2. Wykres zgrzewania dla szyn o profilu 60E1 wykonanych ze stali R350HT [opracowanie własne]

wynikający ze sposobu łączenia. Można wyróżnić w niej trzy wyraźne obszary:

1. Zgrzeina (oś złącza), powstająca w miejscu doczołowego styku dwóch szyn, które podczas zgrzewania zostały uplastycznione i połączone przez wyiskrzenie oraz docięnięcie przy spęczaniu. W makrostrukturze zgrzeina jest widoczna jako wąska linia, która w rzeczywistości ma drobniejsze uziarnienie.
2. Strefa wpływu ciepła (SWC) przylega bezpośrednio do zgrzeiny. Wielkość i charakter tej strefy zależą od parametrów zgrzewania (prądu, czasu iskrzenia, siły docisku).
3. Materiał rodzimy – materiał wyjściowy szyny.

Makrostruktura złącza zgrzewanego iskrowo charakteryzuje się wąską strefą drobnoziarnistą w osi spoiny, przejściową strefą wpływu ciepła oraz niezmienioną strukturą materiału rodzimego szyny, bez ostrych granic i bez wad typowych dla złączy spawanych. Przed zgrzewaniem w walcowanej szynie, linie płynięcia układają się podłużnie, wzdłuż osi szyny, co jest związane z kierunkiem plastycznych odkształceń wprowadzonych do materiału podczas walcowania stali w hucie.

Po wykonaniu złącza zgrzewanego, układ linii płynięcia ulega zaburzeniu: w rdzeniu szyny (środkowa część przekroju), linie płynięcia zostają przerwane i zakrzywione w pobliżu płaszczyzny zgrzewania. Tworzą charakterystyczny obraz „wachlarza” wskazujący na przemieszczenie i plastyczne przetłoczenie metalu podczas zgrzewania i usuwania wypłytki. W strefie przejściowej, z obu stron szyn łączą się i ulegają zagięciu, tworząc ciągłość, ale nie prostą linię. W pobliżu wypłytki są silnie zakrzywione i wyprowadzane ku powierzchni, zgodnie z kierunkiem przepływu plastycznego metalu.

Ma to praktyczne znaczenie, gdyż ciągłość linii płynięcia jest podstawowym kryterium jakości – nie powinno być przerw, szczelin ani nieciągłości. Zakrzywienie i wachlarzowy układ świadczą o prawidłowym uplastycznieniu i zaciśnięciu materiału w złączu. Wszelkie zaburzenia (np. ostre załamania, pęknięcia, lokalne martwe pola) mogą wskazywać na wady złącza. W wyniku badań złącza ze stali R260 (rys. 3) stwierdzono, że strefa wpływu ciepła ma kształt symetryczny względem linii zgrzeiny i mieści się w przedziale szerokości (28–37) mm. Odchylenia pomiędzy minimalnymi i maksymalnymi obszarami oddziaływania cieplnego w zgrzeinie nie przekraczają 10 mm. W linii zgrzewania oraz w obszarze zgrzeiny nie stwierdzono pęknięć, skupisk dużych wtrąceń niemetalicznych, podtopień lub braku przetopu.

W wyniku badań złącza ze stali R260 stwierdzono, że strefa wpływu ciepła ma kształt symetryczny względem linii zgrzeiny i mieści się w przedziale szerokości (28–37) mm. Odchylenia pomiędzy minimalnymi i maksymalnymi obszarami oddziaływania cieplnego w zgrzeinie nie przekraczają 10 mm. W linii

zgrzewania oraz w obszarze zgrzeiny nie stwierdzono pęknięć, skupisk dużych wtrąceń niemetalicznych, podtopień lub braku przetopu.



Rys. 3. Makrostruktura złącza ze stali R260 [opracowanie własne]

Obserwacje złącza, ze stali R350HT (rys. 4) wykazały, że strefa wpływu ciepła ma kształt symetryczny względem linii zgrzeiny i mieści się w przedziale o szerokości (25–34) mm. Odchylenia między minimalnymi i maksymalnymi obszarami oddziaływania cieplnego w zgrzeinie również nie przekraczają 10 mm. W linii zgrzewania oraz w obszarze zgrzeiny nie stwierdzono pęknięć, skupisk dużych wtrąceń niemetalicznych, podtopień lub braku przetopu. W przypadku obu gatunków stali szynowej linie płynięcia miały układ prawidłowy, choć dla stali R350HT były bardziej wyraziste.



Rys. 4. Makrostruktura złącza ze stali R350HT [opracowanie własne]

4.2. Badania mikroskopowe

Stan wyjściowy (materiał rodzimy) mikrostruktury obu badanych gatunków stanowi perlit. Ze względu na obróbkę cieplną stali R350HT wykonywaną w obszarze główki szyny, ziarno perlitu było drobniejsze (zakres badań nie obejmował pomiaru wielkości ziarna). W badanych złączach szynowych zaobserwowano trzy zasadnicze strefy, czyli materiał rodzimy, strefa wpływu ciepła oraz linia zgrzewania.

Oś zgrzewania (linia zgrzewania, jądro złącza) jest to miejsce, gdzie wystąpiło największe nagrzanie i plastyczne odkształcenie metalu podczas docisku. Struktura w tej strefie jest często drobnoziarnista, powstała w wyniku całkowitej rekrystalizacji. Zarówno w przypadku stali R260, jak i R350HT w osi zgrzewania zaobserwowano perlit z niewielką ilością ferrytu,

który stanowił siatkę układającą się wzdłuż ziaren austenitu pierwotnego (rys. 5 i 6, a i c).

Strefa wpływu ciepła to najbardziej złożony obszar, ponieważ mikrostruktura zależy od maksymalnej temperatury, jaką osiągnęły poszczególne rejony podczas cyklu cieplnego. Można tu wyróżnić podstrefy (idąc od osi zgrzewania ku materiałowi rodzimemu):

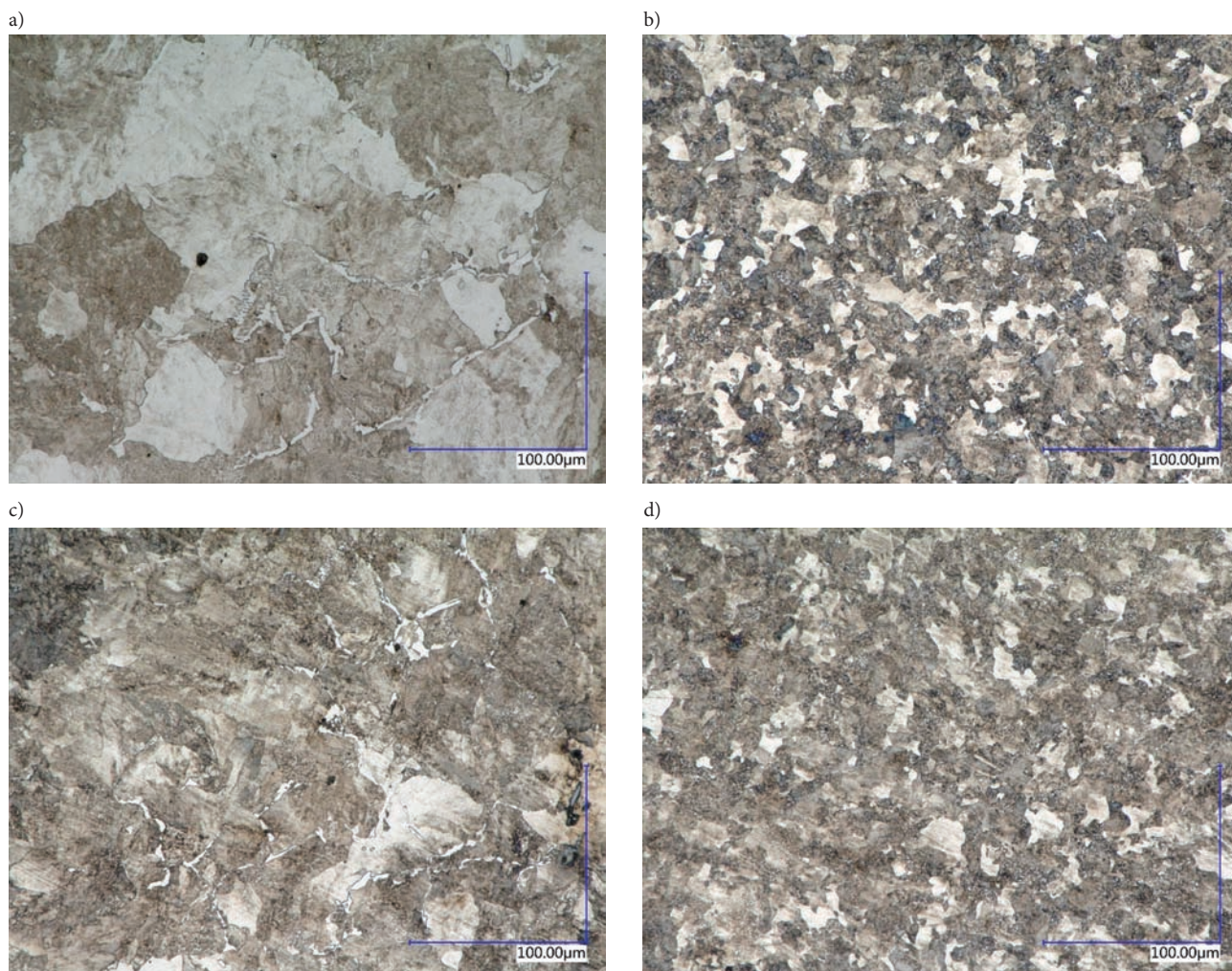
Podstrefa przesycenia (blisko osi zgrzewania) – jest to obszar szczególnie wrażliwy na powstawanie niekorzystnych struktur martenzytycznych lub bainitycznych, gdyż w obszarze tym następuje nagrzanie powyżej temperatury A3, czyli austenitizacja, a następnie szybkie chłodzenie. Jest to strefa, w której szczególnie istotne jest monitorowanie twardości. W obu badanych stalach nie stwierdzono przy powiększeniach $\times 100$ i $\times 500$ struktur bainitycznych ani martenzytycznych, co potwierdziły dalej badania twardości.

Podstrefa normalizacji (dalej od osi), to obszar, w którym temperatura przekroczyła A3, ale czas

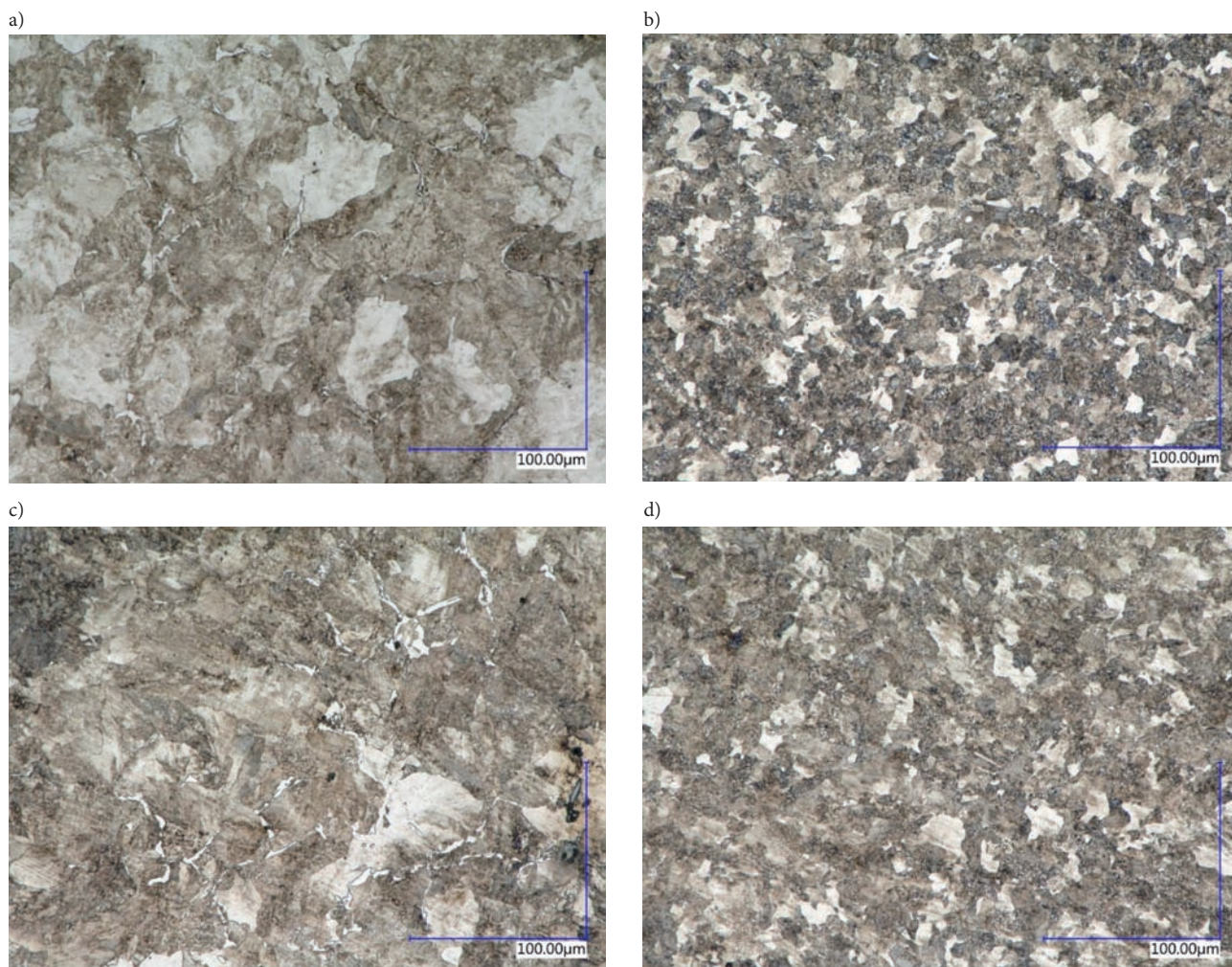
nagrzewania był dłuższy a chłodzenie wolniejsze. W obu badanych stalach, struktury perlityczne w tym obszarze były dość jednorodne (rys. 5 i 6, b i d).

Najbliżej materiału rodzimego znajduje się podstrefa rekrystalizacji, w której nagrzanie materiału nastąpiło w przedziale między A1 i A3. W tym obszarze zaobserwowano największe zmiany twardości.

Mikrostruktura złącza wykonanego ze stali R260 składała się z perlitu i wydawała się stosunkowo jednorodna. W przypadku stali R350HT, ze względu na wcześniejsze hartowanie główki szyny, obserwowane struktury były bardziej zróżnicowane pod względem wielkości ziarna w obrębie strefy wpływu ciepła, jednakże wymuszone chłodzenie, które stanowi etap wytwarzania złącza ze stali R350HT widocznie ograniczyło rozrost ziaren w osi zgrzewania, zatem powstała struktura bardziej drobnoziarnista, ale co najważniejsze – nie zaobserwowano struktur bainityczno-martenzytycznych.



Rys. 5. Mikrostruktura próbki ze stali R260; a) mikrostruktura w linii zgrzewania w próbce ze stali R260 w główce szyny, b) mikrostruktura w strefie wpływu ciepła w próbce ze stali R260 w główce szyny, c) mikrostruktura w linii zgrzewania w próbce ze stali R260 w stopce szyny, d) mikrostruktura w strefie wpływu ciepła w próbce ze stali R260 w stopce szyny [opracowanie własne]



Rys. 6. Mikrostruktura próbki ze stali R350HT; a) mikrostruktura w linii zgrzewania w próbce ze stali R350HT w główce szyny, b) mikrostruktura w strefie wpływu ciepła w próbce ze stali R350HT w główce szyny, c) mikrostruktura w linii zgrzewania w próbce ze stali R350HT w stopce szyny, d) mikrostruktura w strefie wpływu ciepła w próbce ze stali R350HT w stopce szyny [opracowanie własne]

5. Badania twardości

Profil twardości dla zgrzewanego złącza szynowego wykonanego ze stali R260 przedstawiono na rysunku 7.

Średnia twardość HV_{30} badanego złącza szyn zgrzewanych wynosiła 302,2 jednostek twardości. Minimalna wartość twardości wynosiła 280,1 HV_{30} , a maksymalna wartość 336,7 HV_{30} . Rozkład twardości HV_{30} dla badanych złączy mieści się w wymaganiach normy, tj. $P + 60 HV_{30}$ oraz $P - 30 HV_{30}$, gdzie P jest średnią twardością szyn złącza. Profil twardości dla zgrzewanego złącza szynowego wykonanego ze stali R350HT został przedstawiony na rysunku 8.

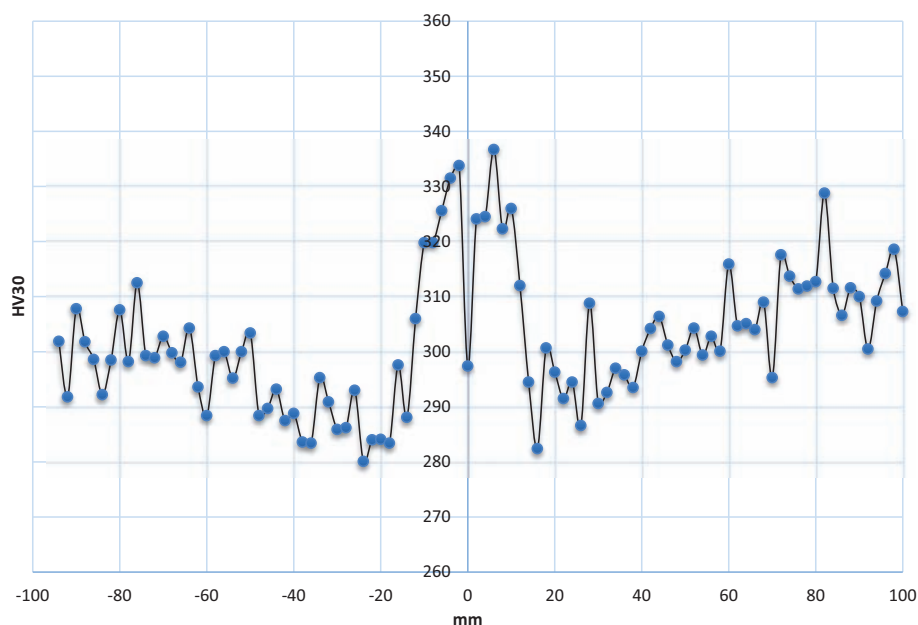
Minimalna twardość HV_{30} w odległości 10 mm od osi badanego złącza szyn zgrzewanych wynosiła odpowiednio 325,0, a maksymalna 401,4 jednostek twardości. Wartości te spełniają wymagania norm przedmiotowych. W przypadku obu badanych złączy w osi zgrzeiny zaobserwowano spadek twardości.

6. Dyskusja wyników

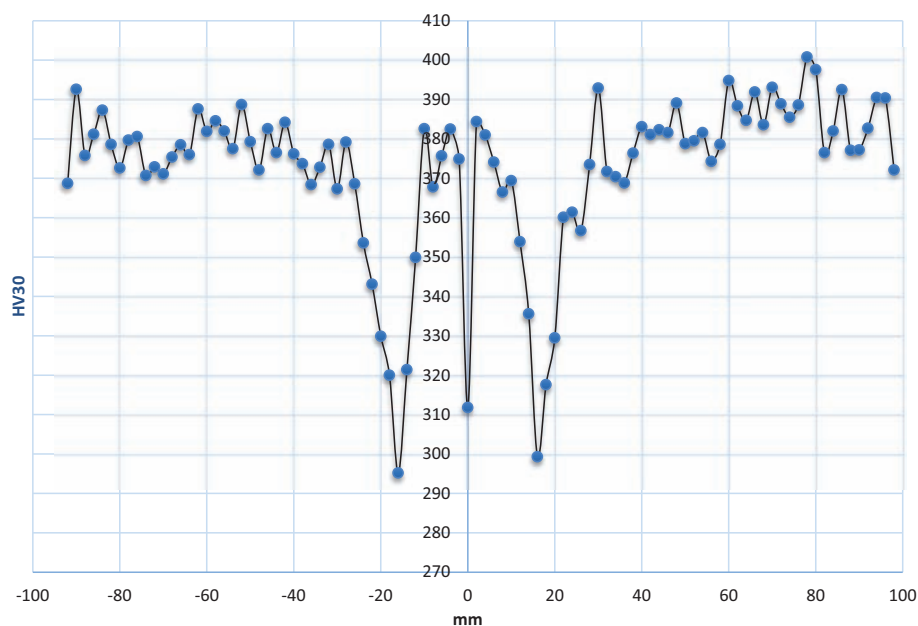
Badania makroskopowe potwierdziły prawidłowy przebieg procesu zgrzewania oporowego iskrowego dla obu analizowanych gatunków stali – R260 i R350HT. Złącza charakteryzowały się symetrycznym kształtem strefy wpływu ciepła oraz poprawnym układem linii płynięcia metalu, co świadczy o właściwym uplastycznieniu materiału w trakcie docisku. Brak nieciągłości, porowatości czy pęknięć dowodzi stabilności zastosowanych parametrów procesu. Jedyną zauważalną różnicą była większa wyrazistość linii płynięcia w przypadku złączy wykonanych ze stali R350HT, wynikająca z jej wyższej twardości i mniej-szej podatności na odkształcenia plastyczne.

Obserwacje mikrostrukturalne wykazały, że zarówno w stali R260, jak i R350HT w osi zgrzewania powstała drobnziarnista struktura perlityczna z niewielkim udziałem ferrytu, będąca efektem pełnej rekrytalizacji. W strefie wpływu ciepła zaobserwowa-

Rys. 7. Profil twardości dla zgrzewanego złącza szynowego wykonanego ze stali R260 (poz. „0” oznacza oś zgrzeiny) [opracowanie własne]



Rys. 8. Profil twardości dla zgrzewanego złącza szynowego wykonanego ze stali R350HT (poz. „0” oznacza oś zgrzeiny) [opracowanie własne]



no trzy podstrefy: przesycenia, normalizacji i częściowej rekrystalizacji. Charakter tych stref odpowiadał wartościom temperatur osiągniętych podczas cyklu cieplnego. Istotnym wynikiem jest brak niekorzystnych struktur bainitycznych i martenzytycznych w obu badanych stalach, co świadczy o właściwym doborze parametrów procesu. W przypadku stali R350HT wymuszone chłodzenie ograniczyło rozrost ziaren w osi zgrzewania, sprzyjając powstaniu bardziej jednorodnej i drobnoziarnistej mikrostruktury.

Badania twardości wykazały zgodność uzyskanych wyników z wymaganiami normatywnymi. W przypadku stali R260 średnia twardość wynosiła

302 HV_{30} , a wartości skrajne mieściły się w zakresie 280–337 HV_{30} . Dla stali R350HT złącza wykazywały wyższe wartości twardości (325–401 HV_{30}), co wynikało z drobniejszej struktury perlitu powstałej w wyniku wcześniejszej obróbki cieplnej główki szyny oraz wymuszonego chłodzenia po procesie zgrzewania. Wyższa twardość stali R350HT wskazuje na jej lepszą odporność na zużycie eksploatacyjne, przy jednoczesnym zachowaniu wymagań dotyczących ciągłości i integralności złącza.

Otrzymane wyniki są spójne z obserwacjami innych autorów badających złącza szynowe wykonane metodami zgrzewania i spawania [4, 9, 11, 12, 14, 21].

W literaturze podkreśla się, że jakość makrostruktury jest silnie uzależniona od gatunku stali oraz parametrów technologicznych [2, 3, 8, 18–20, 22]. W przypadku stali R260 złącza zwykle cechują się równomiernym przebiegiem linii płynięcia oraz niewielkimi odchyleniami w strefie zgrzewania, co zostało również stwierdzone w artykule. W przypadku stali R350HT, zgodnie z badaniami [1], widoczne są wyraźniejsze zakłócenia przepływu metalu, wynikające z większej odporności na odkształcenie i intensywniejszych przemian fazowych podczas nagrzewania.

Podobne zależności obserwowano na poziomie mikrostruktury. Jak wskazują wcześniejsze badania [13] oraz wyniki ostatnich badań, stal R260 po procesach spawalniczych i zgrzewalniczych zachowuje stosunkowo jednorodny układ perlityczny z niewielkim udziałem ferrytu podeutektoidalnego, co wiąże się z jej umiarkowaną twardością i dobrą podatnością na procesy ciepło-mechaniczne. Natomiast, dzięki wcześniejszemu hartowaniu, stal R350HT charakteryzuje się drobną strukturą perlityczną, a przy odpowiednim doborze parametrów technologicznych zgrzewania istnieje możliwość uniknięcia lokalnego występowania bainitu, co potwierdzają niniejsze badania.

Porównanie twardości uzyskanych w zaprezentowanych badaniach z danymi literaturowymi wskazuje na ich zgodność. W wielu opracowaniach [7, 23] podkreślano, że stal R350HT wykazuje wyższe wartości HV zarówno w materiale rodzimym, jak i w strefie złącza, przy jednoczesnym występowaniu ostrzejszych gradientów w obszarze przejściowym. Zjawisko to, potwierdzone również w przedstawionych badaniach, jest uważane za potencjalnie niekorzystne z punktu widzenia trwałości zmęczeniowej, gdyż sprzyja inicjacji pęknięć.

7. Wnioski

1. Proces zgrzewania oporowego iskrowego stali R260 i R350HT przebiegł prawidłowo, a otrzymane złącza spełniają wymagania jakościowe i normatywne.
2. W osi zgrzewania obu gatunków stali zaobserwowano drobnoziarnistą strukturę perlitu z niewielką ilością ferrytu, co potwierdza pełną rekrystaliczację tego obszaru.
3. W strefie wpływu ciepła obu stali wyróżniono podstrefy przesycenia, normalizacji oraz częściowej rekrystaliczacji, jednak nie zaobserwowano niekorzystnych struktur bainitycznych ani martenzytycznych.
4. Wymuszone chłodzenie w procesie zgrzewania stali R350HT ograniczyło rozrost ziaren w osi zgrzewania, co pozwoliło uzyskać strukturę drobnoziarnistą o korzystnych właściwościach mechanicznych.

5. Rozkład twardości HV₃₀ w badanych złączach mieścił się w granicach określonych przez normy, przy czym złącza ze stali R350HT cechowały się wyższą twardością w porównaniu z R260.
6. Złącza wykonane ze stali R350HT wykazują większą odporność na zużycie eksploatacyjne, co uzasadnia stosowanie tego gatunku w torach o dużym natężeniu ruchu oraz w miejscach szczególnie narażonych na obciążenia dynamiczne.

Literatura

1. Alves L. H.D. et.al.: *Influence of rail metallurgy and welding parameterization on the formation of discontinuities in the thermite welding process*, Journal of Materials Research and Technology, 2024, vol. 29, s. 4813–4826. DOI: 10.1016/j.jmrt.2024.07.066.
2. García A., Martín D., de Las Heras S.: *Influence of microstructure on the wear behaviour of pearlitic rail steels*, Tribology International, 2019, 135, s. 1–12.
3. Ghazi A., LIU J.: *Influence of microstructure evolution in flash welded pearlitic rail steels*, Materials Characterization, 2021, 172, 110852.
4. Grodzki T., Błażej A.: *Właściwości eksploatacyjne szyn kolejowych gatunku R260 i R350HT*, Inżynieria Materiałowa, 2020, 6, s. 321–329.
5. Id-106, Warunki techniczne – Skład chemiczny stali szynowych R260 oraz R350HT.
6. Id-112:2013, Warunki techniczne wykonania i odbioru złączy spawanych i zgrzewanych szyn. PKP PLK, Warszawa, 2013.
7. Kaiser A., Schulz H.: *Rail welding: Principles and applications*, Welding in the World, 2018, 62(4), s. 765–776.
8. Kapoor A., Möller P.: *Failure modes in rail welds: a review*, International Journal of Fatigue, 2005, 27(6), s. 575–584.
9. Klein J., Reis L.: *Failure analysis of rail welds in heavy haul lines*, Engineering Failure Analysis, 2014, 45, s. 446–455.
10. Kumar S., Tyagi R., Chattopadhyay K.: *Microstructural evolution and mechanical properties of flash-butt welded R260 grade rail steel*, Materials Science and Engineering: A, 2016, vol. 674, s. 381–391. DOI: 10.1016/j.msea.2016.07.070.
11. LI W. et.al.: *Microstructure and hardness distribution of flash-butt welded joints in R350HT rail steel*, Materials Characterization, 2019, vol. 154, s. 289–297. DOI: 10.1016/j.matchar.2019.06.015.
12. Morales R., Sánchez J.: *Effect of post-weld cooling on flash welded R350HT rails*, Journal of Constructional Steel Research, 2019, 162, s. 105–113.
13. Myers J., Geiger G.H., Poirier D.R.: *Structure and properties of thermite welds in rails*, Welding Journal, 1982, t. 61, nr 8, s. 258–268 s.

14. Ostermeier B., Schulz R.: *Microstructure and hardness distribution in flash butt welded rail joints*, Materials Testing. 2016, 58(9), s. 773–781.
15. PN-57/H-04501: Badania metalograficzne – Trawienie zgładów, Warszawa, PKN, 1957.
16. PN-EN 14587-1:2019-03: Kolejnictwo – Tor – Spawanie szyn – Część 1: Zgrzewanie oporowe iskrowe szyn kolejowych, Warszawa, PKN, 2019.
17. PN-EN ISO 6507-1:2018. Metale – Pomiar twardości metodą Vickersa, Warszawa: PKN, 2018.
18. Sawley K., Kaewunruen S.: *Effects of welding on rail steel microstructure and properties*, Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(11), s. 2375–2383.
19. Schroeder L.C., Poirier D.R.: *Structure and properties of thermite welds in premium rails*, Report No. DOT/FRA/ORD-85/02, Washington, D.C.: U.S. Department of Transportation, Federal Railroad Administration, 1985.
20. Steenbergen M., Eslveld C., Dollevoet R.: *Assessment of rail weld geometry by finite element modelling*, Wear, 2006, 260(1–2), s. 126–136.
21. Zentner L., Voigt H.: *Heat affected zone in flash-butt welded rails: Structure and properties*, Journal of Materials Engineering and Performance, 2017, 26(7), s. 3570–3578.
22. Zhang Y., Zhou Q., Zhang X.: *Microstructure and mechanical properties of flash butt welded rail joints*, Materials Science and Engineering A. 2016, 662, s. 70–78.
23. Zhou J., Li X., Wang Y.: *Wear and fatigue performance of R350HT flash butt welded joints under heavy haul traffic*, Wear, 2020, 454–455, 203316.