



INSTYTUT SPAWALNICTWA

44-100 Gliwice, ul. Bł. Czesława 16-18
tel. 32 231-00-11, fax 32 231-46-52, www.is.gliwice.pl

Zakład Badań Spawalności i Konstrukcji Spawanych

Kierownik zespołu badawczego: dr inż. Krzysztof Krasnowski
Zespół badawczy: dr inż. Piotr Sędek, prof. nzw

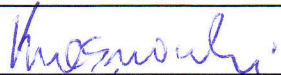
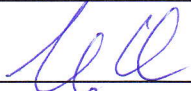
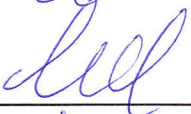
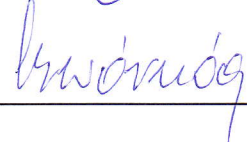
SPRAWOZDANIE Z PRACY BADAWCZEJ

Nr Hb-102 (B-284/16)

„Badanie złączy szyn tramwajowych pod względem oceny zgodności spawalniczej”

Zamawiający: Gmina Miasto Szczecin,
pl. Armii Krajowej 1, 70-456 Szczecin

Pracę rozpoczęto/zakończono: 25.02.2016 / 23.03.2016

Sprawozdanie opracowali:	Dr inż. Krzysztof Krasnowski	
	Dr inż. Piotr Sędek, prof. nzw.	
Pracę kontrolował:	Dr inż. Piotr Sędek, prof. nzw.	
Pracę akceptował:	Dr inż. Bogusław Czwórnóg Z-ca Dyrektora Instytutu Spawalnictwa	

Wykonano 4 egzemplarze dla:

Gmina Miasto Szczecin - 2 egz.

Zakład ZB - 1 egz.

Dział KE (archiwalny) - 1 egz.

Stron: 27 Rys.: 2 Tabl.: 11 Poz. bibl.: 10 Załączniki: -

Stopień utajnienia: -

Streszczenie

Praca dotyczyła analizy dwóch pękniętych złączy szyn tramwajowych spawanych termitowo. Przedmiotowe złącza zostały pobrane z torowiska w Szczecinie, gdzie podczas ich eksploatacji doszło do pęknięć. Zakres pracy obejmował badania na zgodność materiału podstawowego z atestem producenta oraz normą wyrobu (badania składu chemicznego, badania metalograficzne, badania wytrzymałościowe), a także analizę złączy w obszarze wystąpienia pęknięć oraz w obszarze główek oraz stopek szyn. Na podstawie wykonanych badań sformułowano wnioski wskazujące prawdopodobną przyczynę pęknięcia.

Słowa kluczowe: szyny tramwajowe, stal szynowa R260, pękanie, spawanie termitowe

Spis treści

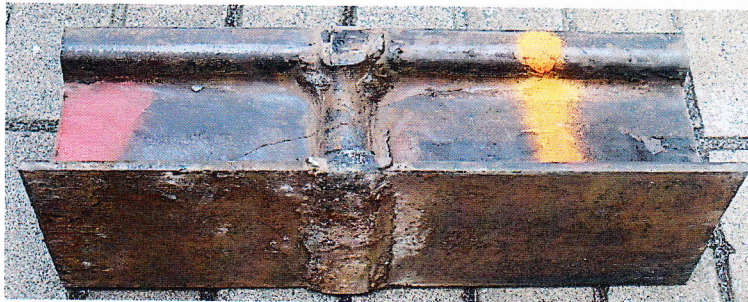
1. Przedmiot badań	4
2. Cel badań	5
3. Plan i przebieg badań.....	5
3.1 Analiza składu materiału podstawowego szyn.....	6
3.2 Analiza składu metalu spoiny.....	7
3.3 Badania właściwości mechanicznych materiału szyn	7
3.4 Badanie udarności materiału podstawowego.....	9
3.5. Badania metalograficzne makroskopowe	10
3.5. Badania metalograficzne mikroskopowe	11
3.6 Pomiary twardości.....	18
4. Analiza wyników badań.....	20
5. Wnioski	25
6. Normy powołane	26

1. Przedmiot badań

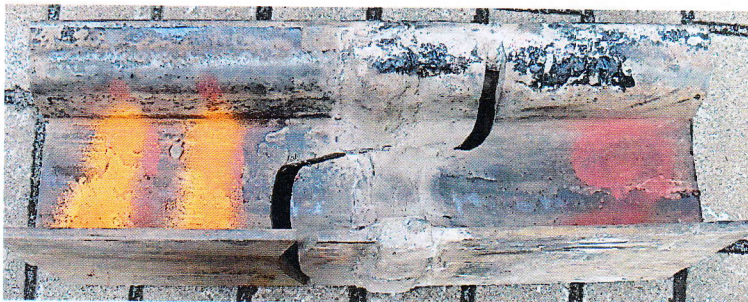
Przedmiotem badań były dwa pęknięte złącza szyn tramwajowych rowkowych typu 60R2 spawanych termitowo. Złącza zostały oznaczone jako I oraz II (wg protokołu pobrania próbek: Złącze nr I – tok szynowy lewy, ul. Gdańska, hektometr projektowy 1480, Złącze nr II- tok szynowy prawy, ul. Gdańska, hektometr projektowy 1977). Wraz ze złączami do badań Zleceniodawca dostarczył: Świadectwo odbioru szyn 3.1 nr 3812/2014 wystawione przez Voestalpine Schienen GmbH, Deklarację Zgodności szyn nr 3812/2014, Protokół zdawczo-odbiorczy z dnia 29.09.2014 r. oraz Protokół z pobrania próbek z torowiska z dnia 08.01.2016 r. Zleceniodawca nie był w stanie określić numeru wytopu, który odpowiadał dostarczonym do badań elementom. Widok ogólny dostarczonych do badań złączy przedstawiono na rysunku 1. Przebieg pęknięcia w obu złączach miał ten sam kształt.



a)



b)



c)

Rys.1 Widok dostarczonych do badań złączy; a) widok ogólny, b) złącze nr I, c) złącze nr II

Instytut Spawalnictwa Gliwice	Praca badawcza nr B-284/16	Strona/ stron 5/27
----------------------------------	----------------------------	-----------------------

W późniejszym okresie Zleceniodawca przesłał elektronicznie Instrukcję Spawania WPS T/TERM/01 sporządzoną przez firmę Taumer oraz Warunki Techniczne Wykonania i Odbioru złączy szynowych 49E1, 60E1 spawanych termitowo, metodą SoWoS-P sporządzone przez Rolf Plötz Polska Sp. z o. o. Dostarczono również następujące zaświadczenia personalne uprawniające do wykonywania prac spawalniczych w zakresie spawania termitem szyn i rozjazdów kolejowych metodami SoWoS-P R350:

- zaświadczenie nr 138/St/2015 dla Damian Dobranowski (ważne do 19.05.2017 r.),
 - zaświadczenie nr 70/St/2015 dla Łukasz Bronkowski (ważne do 19.04.2017 r.),
 - zaświadczenie nr 14/St/2015 dla Konrad Irzyk (ważne do 25.02.2017 r.),
 - zaświadczenie nr 13/St/2015 dla Dominik Cabala (ważne do 25.02.2017 r.),
 - zaświadczenie nr 24/St/2015 dla Artur Pracon (ważne do 16.10.2016 r.),
- oraz zaświadczenie kompetencji w zakresie nadzoru, kontroli wykonania i odbioru spawalniczych robót wykonywanych w nawierzchni kolejowej infrastruktury PKP Polskich Linii Kolejowych S.A.:
- zaświadczenie nr 64/Ns/2015 dla Artur Knafel (ważne do 06.08.2016 r.).

2. Cel badań

Celem pracy, zgodnie z umową nr WGKiOŚ/134/2016 z dnia 19.02.2016 r., było wykonanie badań dostarczonych pękniętych złączy spawanych pod względem oceny ich zgodności spawalniczej, tzn. zgodności materiału podstawowego, analizy metalograficznej złącza spawanego w obszarze pęknięcia i poza nim, pomiarów twardości złącza, oznaczenia składu chemicznego spoiny oraz analizie dostarczonej dokumentacji technologii spawania.

3. Plan i przebieg badań

Do realizacji celu ustalono plan badań zakładający:

- analizę składu chemicznego materiału podstawowego szyn oraz metalu spoiny,
- badania właściwości mechanicznych materiału szyn (określenie $R_{e0,2}$, R_m , A_5),
- badania odporności na kruche pęknięcie materiału szyn (określenie KV_2),
- badania metalograficzne makroskopowe i mikroskopowe w strefie pęknięcia i poza strefą pęknięcia (w strefie stopki i główki szyny),
- pomiary twardości w obszarze pęknięcia oraz na przekroju złącza spawanego,
- analizę wyników badań oraz wnioski.

3.1 Analiza składu materiału podstawowego szyn

Analizie składu chemicznego poddano materiał podstawowy szyn nr I oraz nr II oraz metal spoiny w obydwu złączach. Zawartości pierwiastków takich jak: C, Si, Mn, P, S, Cr, Mo, Ni, Cu, Al, Co, Nb, Sn, Ti, V, W, Zr, Fe zostały oznaczone za pomocą spektrometru iskrowego Q4 TASMAN firmy BRUCKER. Wyniki analizy zestawiono w tabelicy 1.

Tablica 1. Wyniki analizy składu chemicznego materiału podstawowego szyny nr I oraz szyny nr II

Pierwiastek	Zawartość pierwiastków w %		Wg atestu producenta stali nr 3812/2014 (wytop nieznan)	Wymagania wg normy PN-EN 14811+A1 [1] dla stali R260
	Szyna nr I	Szyna nr II		
C	0,804	0,814	0,72 – 0,75	0,6 – 0,82
Si	0,396	0,445	0,29 – 0,33	0,13 – 0,60
Mn	1,05	1,08	0,92 – 0,95	0,65 – 1,25
P	0,015	0,016	0,019 – 0,021	max. 0,03
S	0,014	0,010	0,020 – 0,022	max. 0,03
Cr	0,056	0,056	0,02 – 0,04	max. 0,15
Mo	0,008	0,006	0,002 – 0,010	max. 0,02
Ni	0,034	0,019	-	-
Cu	0,036	0,020	0,02 – 0,03	max. 0,15
Al	0,001	0,003	0,001	max. 0,004
Co	0,003	0,002	-	-
Nb	0,002	0,003	-	-
Sn	0,003	0,002	-	-
Ti	<0,001	<0,001	-	-
V	<0,001	<0,001	-	-
W	<0,005	<0,005	-	-
Zr	<0,001	0,001	-	-
Fe	97,52	97,46	-	-

Ze względu na brak możliwości ustalenia przez Zleceniodawcę dokładnych numerów wytopów odpowiadających dostarczonemu do badań szyn, w tabelicy 1 przedstawiono zakresy minimalnych i maksymalnych stężeń pierwiastków chemicznych dla wszystkich 10 wytopów wyszczególnionych na świadectwie odbioru szyn nr 3812/2014.

3.2 Analiza składu metalu spoiny

Analizie składu chemicznego poddano metal spoiny ze złączy szyn nr I oraz nr II oraz metal spoiny w obydwu złączach. Zawartości pierwiastków takich jak: C, Si, Mn, P, S, Cr, Mo, Ni, Cu, Al, Co, Nb, Sn, Ti, V, W, Zr, Fe zostały oznaczone za pomocą spektrometru iskrowego Q4 TASMANN firmy BRUCKER. Wyniki analizy zestawiono w tabeli 2, gdzie podano również wymagania odnośnie składu chemicznego stopiwa termitowego w złączach szyn kolejowych ze stali R260 wg PN-EN 14730-1+A1:2010 [8].

Tablica 2. Wyniki analizy składu chemicznego metalu spoiny złącza szyny nr I oraz szyny nr II

Pierwiastek	Zawartość pierwiastków w %		Wymagania wg PN-EN 14730-1+A1:2010 [8] dla spoin w złączach szyn ze stali R260
	Spoina szyny nr I	Spoina szyny nr II	
C	0,74	0,764	0,28 – 0,87
Si	1,34	1,34	<1,45
Mn	0,952	1,03	0,30 – 1,60
P	0,020	0,019	<0,035
S	0,007	0,008	<0,035
Cr	0,117	0,113	<0,20
Mo	0,034	0,034	<0,10
Ni	0,069	0,069	<0,10
Cu	0,062	0,045	<0,20
Al	0,200	0,241	-
Co	0,009	0,009	-
Nb	0,012	0,012	<0,01
Sn	0,005	0,004	-
Ti	<0,001	<0,001	<0,05
V	0,009	0,009	<0,25
W	0,015	0,011	-
Zr	<0,001	<0,001	-
Fe	96,34	96,23	-

3.3 Badania właściwości mechanicznych materiału szyn

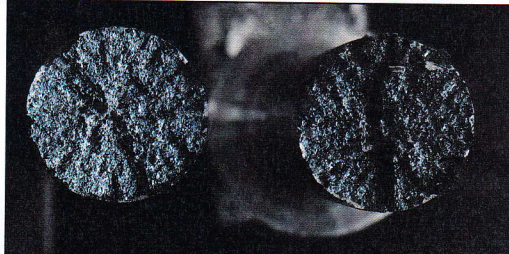
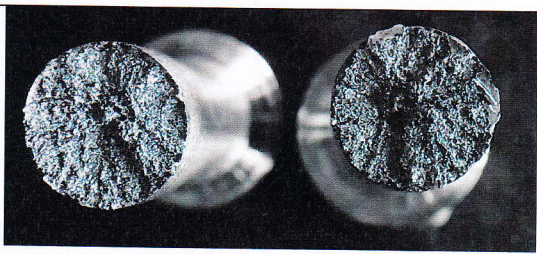
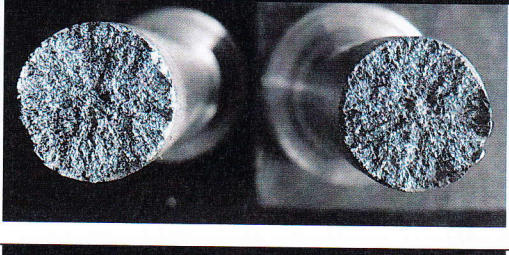
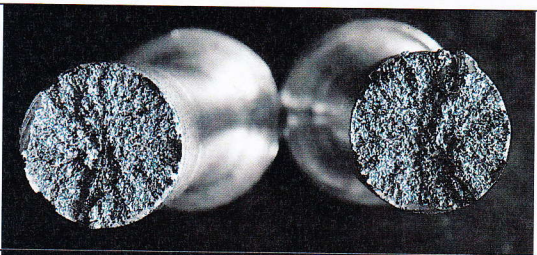
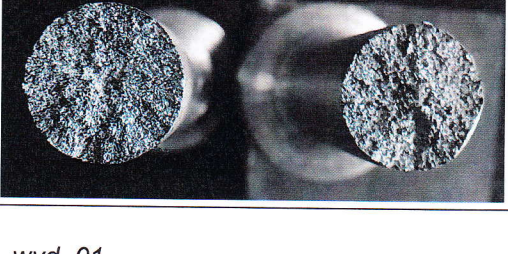
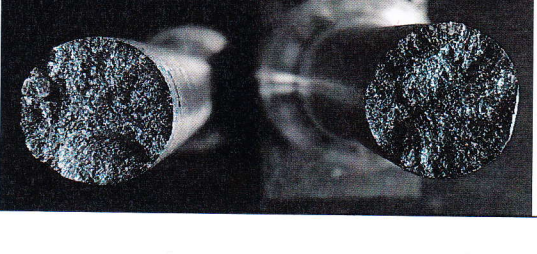
Badania własności wytrzymałościowych (umowna granica plastyczności $R_{e0,2}$, wytrzymałość na rozciąganie R_m) oraz plastycznych (wydłużenie A_5) przeprowadzono na 3 próbkach o przekroju okrągłym z każdej badanej szyny pobranych z obszaru główki szyny zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 14811+A1 [1]. Próbę

statycznego rozciągania materiału podstawowego przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN ISO 6892-1 [2] w temperaturze otoczenia. Badania prowadzono w celu potwierdzenia zgodności materiałowej szyn. Wyniki badań przedstawiono w tablicy nr 3, a w tablicy 4 przedstawiono widok przełomów próbek po badaniach.

Tablica nr 3. Wyniki badań wytrzymałościowych

Ozn. próbki	Wymiary próbki d_0 , mm	Początkowa długość pomiarowa L_0 , mm	Długość pomiarowa po zerwaniu L_u , mm	Wydłużenie A_5 , %	Umowna granica plastyczności $R_{e0,2}$, MPa	Wytrzymałość na rozciąganie R_m , MPa
I/R/1	9,92	50	54,8	9,6	842,8	1258
I/R/2	9,93	50	55,6	11,2	817,0	1255
I/R/3	9,93	50	54,9	9,8	863,6	1255
II/R/1	9,94	50	55,7	11,4	814,5	1253
II/R/2	9,95	50	54,6	9,2	819,1	1250
II/R/3	9,90	50	55,0	10,0	811,5	1227
Wymagania wg normy PN-EN 14811+A1 [1] dla stali R260				min. 10	-	min. 880
Wg atestu producenta stali nr 3812/2014 (wytop nieznan)				12,1 – 12,5	496 - 510	933 - 948

Tablica nr 4. Widok przełomów po próbie statycznego rozciągania

Nr próbki	Przełomy próbek z nr I	Przełomy próbek z szyny nr II
1		
2		
3		

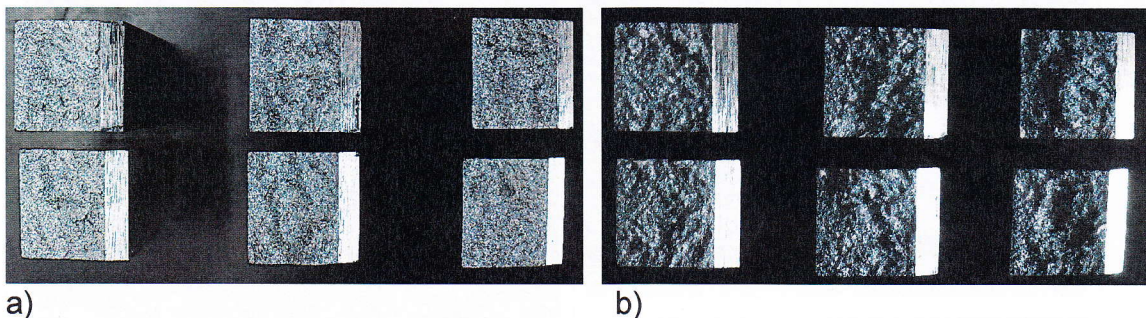
W tabelicy 3 pogrubioną czcionką zaznaczono te wartości wydłużenia, które nie spełniają wymagań normy PN-EN 14811+A1:2010. W zakresie własności wytrzymałościowych ww. norma odnosi się tylko do wytrzymałości na rozciąganie R_m , gdzie określono poziom minimalny jako 880 MPa. Uzyskane wyniki badań spełniają to wymaganie normowe, jednakże wartości granicy plastyczności jak i wytrzymałości na rozciąganie są dużo większe, niż wynika to z przedstawionego atestu materiałowego nr 3812/2014.

3.4 Badanie udarności materiału podstawowego

Badania udarności (odporności na kruche pękanie) wykonano w temperaturze otoczenia za pomocą młota udarowego Amsler RPD 300, na serii trzech próbek o wymiarach 10x10x55 mm, z naciętym karbem Charpy V, pobranych z obszaru główek szyn nr I i nr II. Badania przeprowadzono zgodnie z wymaganiami normy PN-EN ISO 148-1 [3]. Wyniki badania zestawiono w tabl. 5. Widok przełomów udarnościowych przedstawiono na rysunku 2.

Tablica nr 5. Wyniki badań udarnościowych

Lp.	Praca łamania KV_2 [J] w temperaturze otoczenia	
	MR I	MR II
1	10	12
2	10	10
3	12	8
Wartość śr.	10,7	10,0

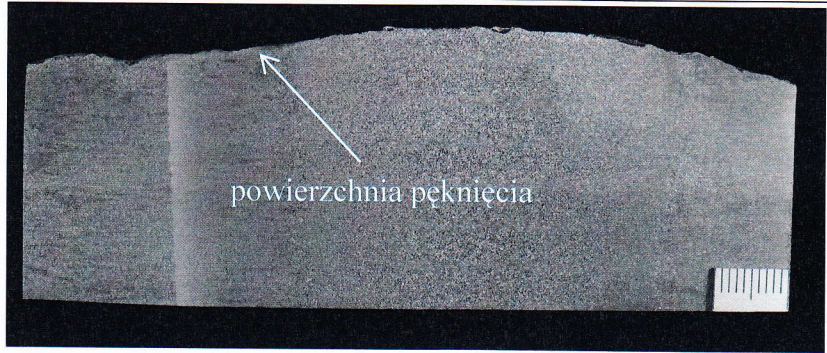
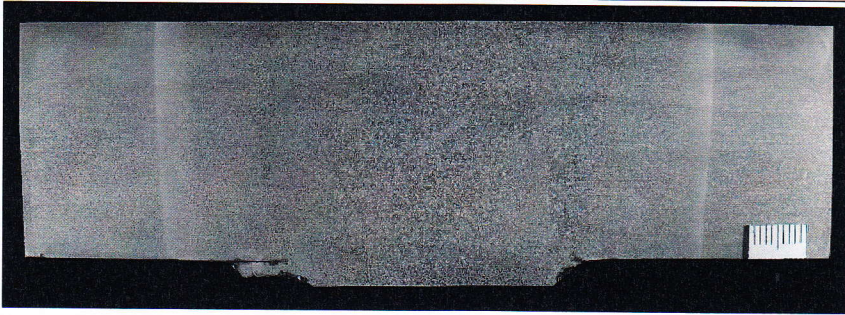
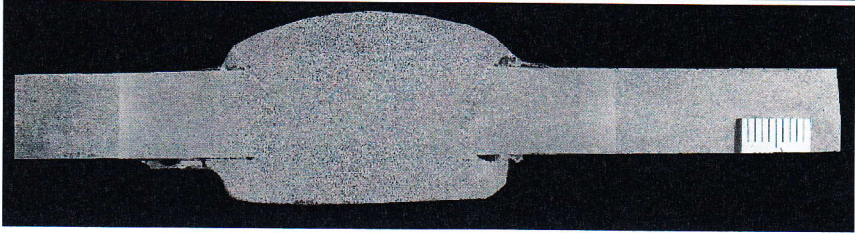


Rys. 2. Widok przełomów udarnościowych po badaniu, a) materiał rodzimy szyny I,
b) materiał rodzimy szyny II

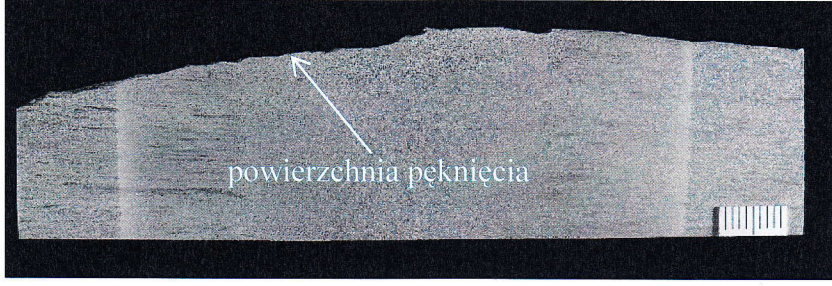

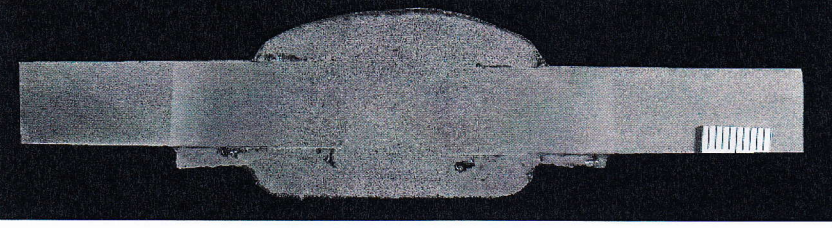
3.5. Badania metalograficzne makroskopowe

Badania metalograficzne makroskopowe przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN ISO 17639:2013-12 [4] na odpowiednio wyszlifowanych i wytrawionych zgładach metalograficznych pobranych z każdego badanego złącza nr I i nr II z obszarów pęknięcia, z obszaru złącza przy główce szyny oraz z obszaru złącza w stopce szyny. Makrostrukturę złączy w badanych obszarach uzyskano poprzez trawienie zanurzeniowe w odczynniku Adlera. Wyniki badań w postaci uzyskanych obrazów makrostruktur przedstawiono w tabelicy 6.

Tablica nr 6. Wyniki badań metalograficznych makroskopowych

Badany obszar	Makrostruktura	Uwagi
Złącze nr I obszar pęknięcia		-
Złącze nr I obszar główki szyny		prawidłowe wtopienie
Złącze nr I obszar stopki szyny		prawidłowe wtopienie

cd. tablicy 6




Badany obszar	Makrostruktura	Uwagi
Złącze nr II obszar pęknięcia		-
Złącze nr II obszar główki szyny		prawidłowe wtopienie
Złącze nr II obszar stopki szyny		prawidłowe wtopienie

3.5. Badania metalograficzne mikroskopowe

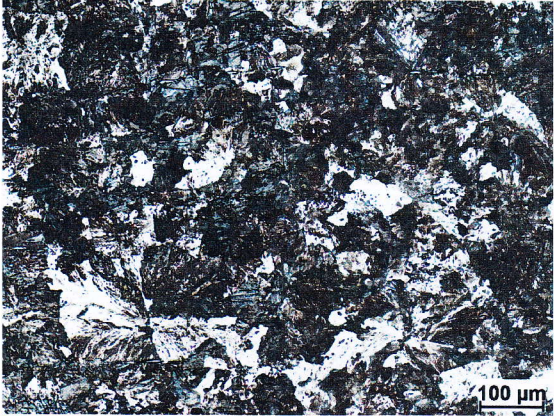
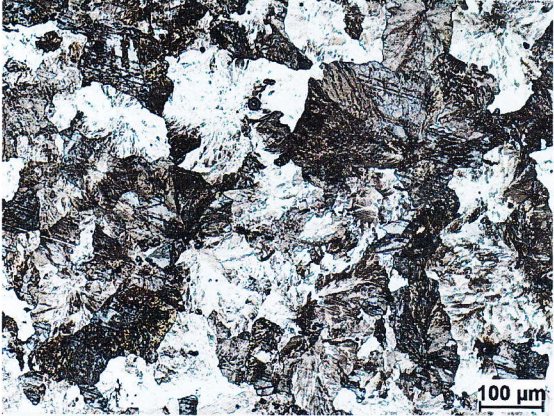
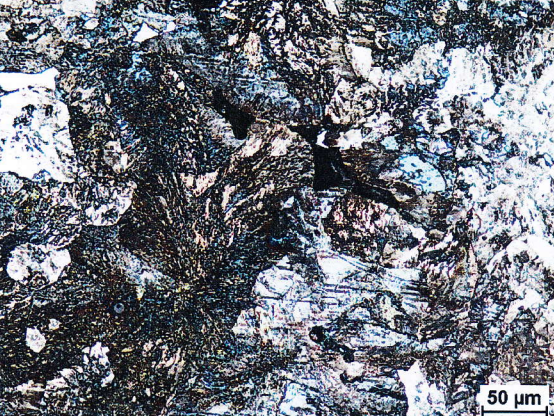

Badania metalograficzne mikroskopowe złączy spawanych szyn przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN ISO 17639:2013-12 [4] przy użyciu mikroskopu NIKON MA-200 na odpowiednio wypolerowanych i wytrawionych zgładach. Mikrostrukturę ujawniono za pomocą trawienia zanurzeniowego w Nitalu. Badaniom metalograficznym mikroskopowym podlegały te same próbki na których przeprowadzono badania makroskopowe. Celem badań mikroskopowych było ujawnienie mikrostruktury w celu określenia występowania struktur hartowniczych (martenzyt/bainit) oraz ewentualnych niezgodności spawalniczych. W związku z brakiem norm i wymagań określających kryteria dla złączy spawanych szyn tramwajowych, w badaniach posłużono się wymaganiami stawianymi w normie

PN-EN 14587-1:2007 [5] dotyczącymi zgrzewania iskrowego szyn również w gatunku R260. Wyniki badań metalograficznych mikroskopowych zostały przedstawione w tablicy 7.


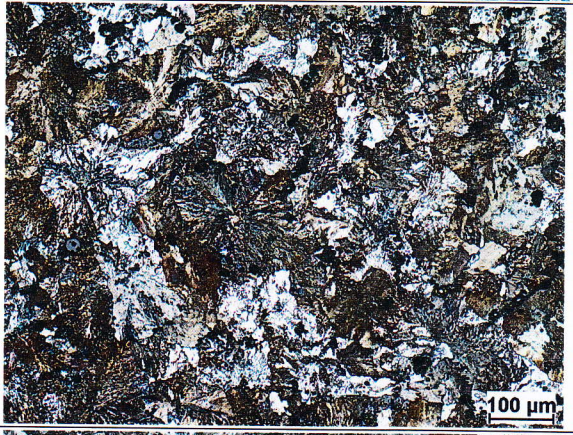
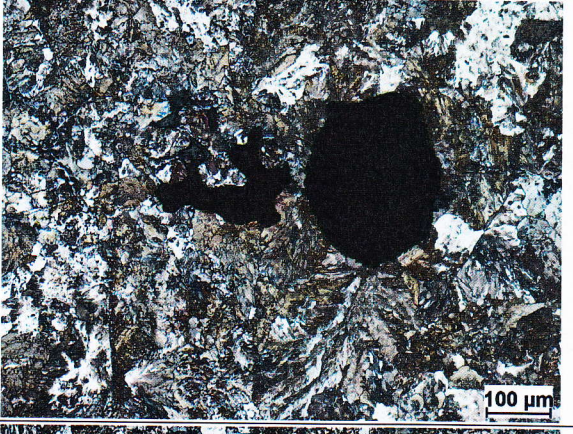
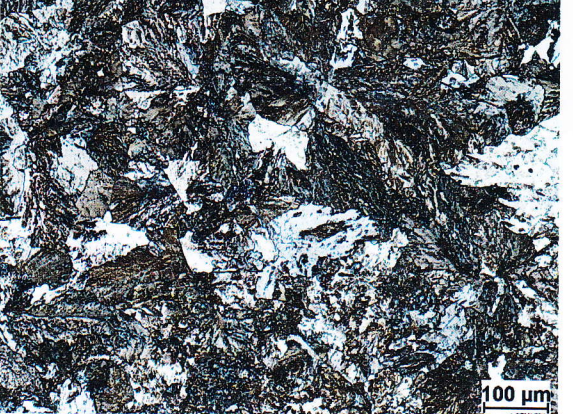
Tablica 7. Wyniki badań metalograficznych mikroskopowych badanych złączy szyn

Badany obszar	Mikrostruktura	Opis
Złącze nr I MR w obszarze krawędzi pęknięcia		Perlit Pow. 100x
Złącze nr I SWC w obszarze krawędzi pęknięcia		Perlit Pow. 100x
Złącze nr I Spoina w obszarze krawędzi pęknięcia		Perlit Pow. 100x

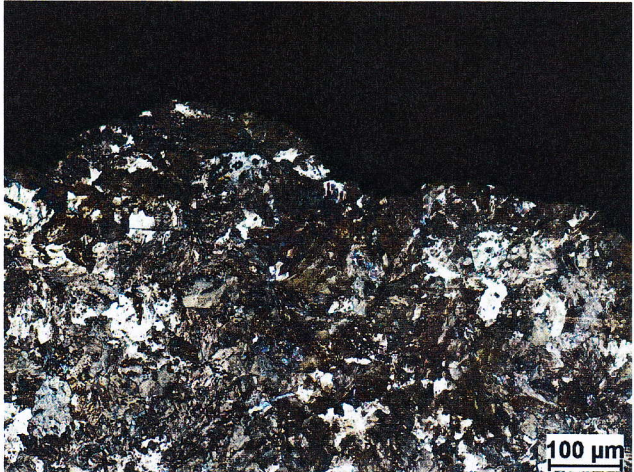
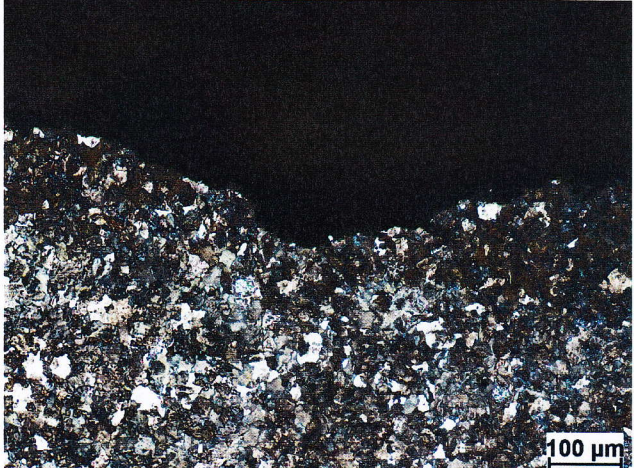
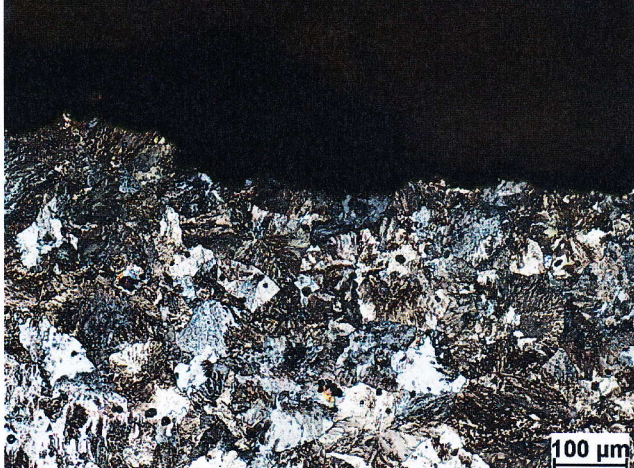
cd. tablicy 7.

Badany obszar	Mikrostruktura	Opis
Złącze nr I MR w obszarze główki szyny		Perlit Pow. 100x
Złącze nr I Spoina w obszarze główki szyny		Perlit Pow. 100x
Złącze nr I Spoina w obszarze główki szyny		Pęcherze gazowe Perlit Pow. 200x
Złącze nr I SWC w obszarze główki szyny		Perlit Pow. 100x

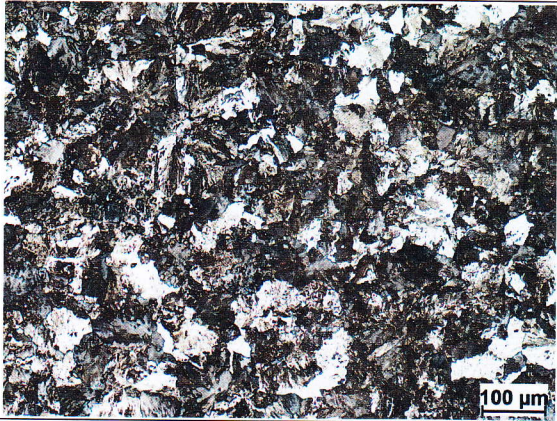
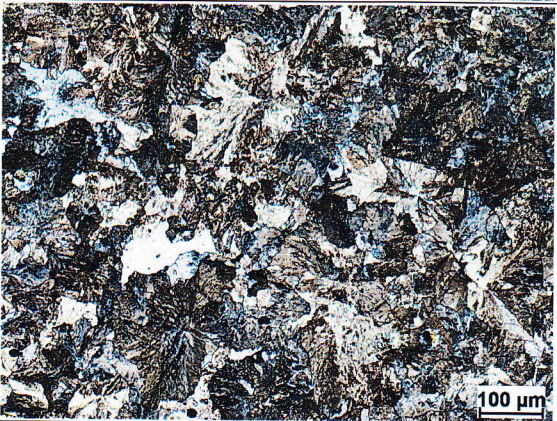
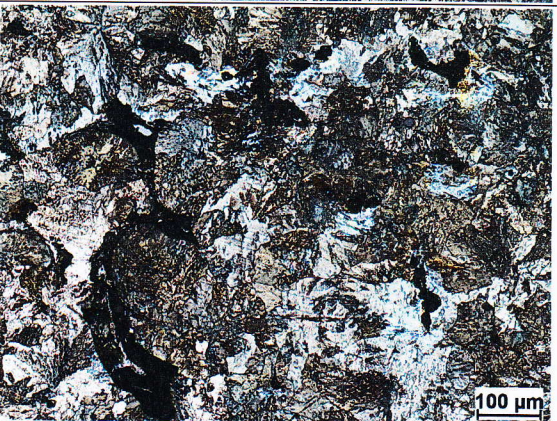

cd. tablicy 7.

Badany obszar	Mikrostruktura	Opis
Złącze nr I MR w obszarze stopki szyny		Perlit Pow. 100x
Złącze nr I Spoina w obszarze stopki szyny		Perlit Pow. 100x
Złącze nr I Spoina w obszarze stopki szyny		Pęcherze gazowe Perlit Pow. 100x
Złącze nr I SWC w obszarze stopki szyny		Perlit Pow. 100x

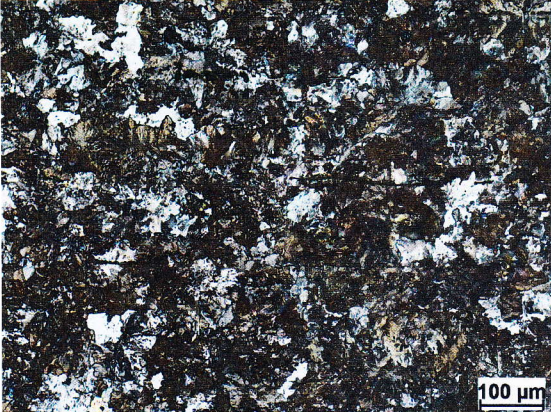
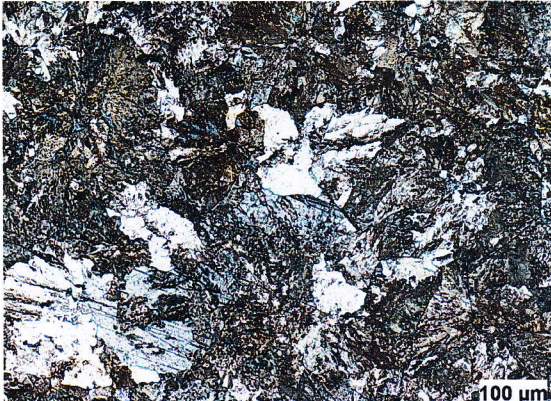
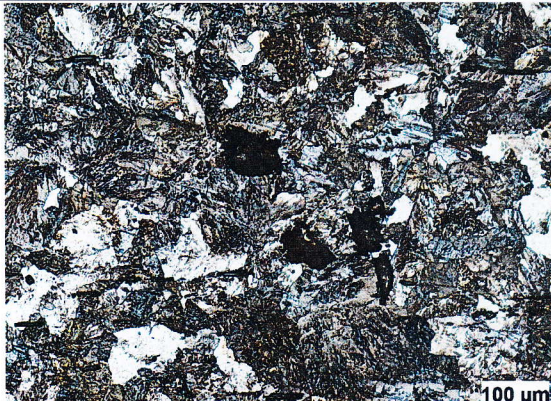
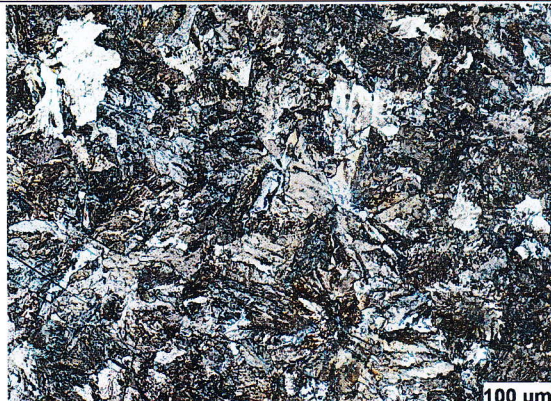
cd. tablicy 7.

Badany obszar	Mikrostruktura	Opis
<p>Złącze nr II</p> <p>MR w obszarze krawędzi pęknięcia</p>		<p>Perlit</p> <p>Pow. 100x</p>
<p>Złącze nr I</p> <p>SWC w obszarze krawędzi pęknięcia</p>		<p>Perlit</p> <p>Pow. 100x</p>
<p>Złącze nr I</p> <p>Spoina w obszarze krawędzi pęknięcia</p>		<p>Perlit</p> <p>Pow. 100x</p>

cd. tablicy 7.

Badany obszar	Mikrostruktura	Opis
Złącze nr II MR w obszarze główki szyny		Perlit Pow. 100x
Złącze nr II Spoina w obszarze główki szyny		Perlit Pow. 100x
Złącze nr II Spoina w obszarze główki szyny		Pęcherze gazowe Perlit Pow. 100x
Złącze nr II SWC w obszarze główki szyny		Perlit Pow. 100x

cd. tablicy 7.

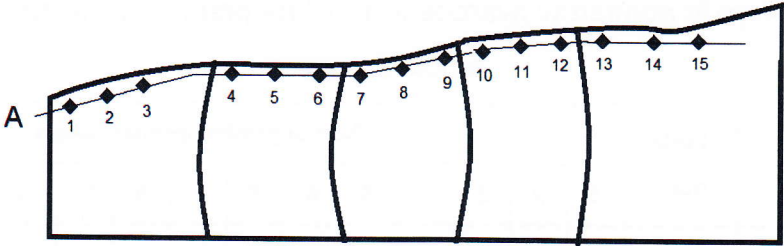
Badany obszar	Mikrostruktura	Opis
Złącze nr II MR w obszarze stopki szyny		Perlit Pow. 100x
Złącze nr II Spoina w obszarze stopki szyny		Perlit Pow. 100x
Złącze nr II Spoina w obszarze stopki szyny		Pęcherze gazowe Perlit Pow. 100x
Złącze nr II SWC w obszarze stopki szyny		Perlit Pow. 100x

3.6 Pomiary twardości

Pomiary twardości na przekrojach poprzecznych złączy wykonano metodą Vickersa zgodnie z normą PN-EN ISO 6507-1 [6] przy obciążeniu wgłębnika siłą 98,1 N (HV10). Badania prowadzono przy użyciu twardościomierza automatycznego typu KB50BYZ-FA na odpowiednio przygotowanych próbkach poddanych wcześniej badaniom metalograficznym mikroskopowym. Badania prowadzono wykonując po 15 odcisków pomiarowych wzdłuż tzw. linii pomiarowych. Wyniki badań zestawiono w tablicach 8-10, gdzie również przedstawiono schematycznie rozmieszczenie linii pomiarowych.

Tablica 8. Wyniki pomiarów twardości HV10 na przekroju złącza w obszarze pęknięcia

Obszar badania	Linia pom.	Numer punktu pomiarowego														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Złącze I pęknięcie	A	299	264	291	312	339	344	376	359	371	339	369	348	306	280	293
Złącze II pęknięcie	A	308	316	316	345	368	361	368	341	349	338	344	355	309	304	285



Tablica 9. Wyniki pomiarów twardości HV10 na przekroju złącza w obszarze
główki szyny

Obszar badania	Linia pom.	Numer punktu pomiarowego														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Złącze I w obszarze główki	A	357	353	353	299	330	324	371	330	353	320	333	284	351	348	350
	B	334	320	311	322	317	318	356	347	341	320	310	320	310	321	336
Złącze II w obszarze główki	A	332	336	332	325	345	335	377	351	351	352	357	334	354	320	376
	B	334	339	323	347	330	338	362	296	341	362	327	333	328	336	345

Tablica 10. Wyniki pomiarów twardości HV10 na przekroju złącza w obszarze
stopki szyny

Obszar badania	Linia pom.	Numer punktu pomiarowego														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Złącze I w obszarze stopki	A	306	312	304	344	360	326	319	342	340	330	347	344	321	316	306
Złącze II w obszarze stopki	A	308	309	309	341	354	323	364	357	353	329	334	356	311	309	310

4. Analiza wyników badań

Badania pękniętych złączy szyn tramwajowych o profilu 60R2 przeprowadzono w celu oceny ich zgodności spawalniczej. Do badań dostarczono dwa złącza spawane szyn oznaczone numerami I oraz II.

W pierwszym etapie badań przeprowadzono szereg badań na zgodność materiału podstawowego (stali R260) z wymaganiem normy PN-EN 14811+A1:2010 oraz dostarczonym świadectwem odbioru 3.1 nr 3812/2014, przy czym Zleceniodawca nie wskazał numeru/numerów wytopów z których były wykonane przedmiotowe złącza szyn.

Analiza składu chemicznego materiału rodzimego szyn wykazała, że zawartość wszystkich składników stopowych jest zgodna z wymaganiem normy wyrobu PN-EN 14811+A1:2010 [1] dla stali w gatunku R260 (tablica 1), jednakże na uwagę zasługuje fakt, że oznaczone zawartości C, Si oraz Mn są wyższe, niż zawarte w świadectwie odbioru nr 3812/2014 dla wszystkich wymienionych w nim wytopów (tablica 1). Analiza składu chemicznego metalu spoin wykazała, że spełniają one wymagania stawiane spoinom termitowym w złączach szynowych kolejowych ze stali R260 wg normy PN-EN 14730-1+A1:2010 [8].

Badania wytrzymałościowe, tj. próba statycznego rozciągania wykonywana była zgodnie z wymaganiami norm PN-EN ISO 6892-1:2010 [2] oraz PN-EN 14811+A1:2010 [1] na 3 próbkach o przekroju okrągłym pobranych z materiału główki szyn. Wyniki badań zestawione w tablicy 3 wykazały, że badany materiał podstawowy szyn spełnia wymagania co do minimalnej wartości wytrzymałości na rozciąganie dla stali w gatunku R260 (min. 880 MPa wg PN-EN 14811+A1), natomiast niektóre z próbek, pobrane zarówno z materiału rodzimego złącza nr I oraz złącza nr II, nie spełniały wymagań odnośnie minimalnej wartości wydłużenia (A_5 min. 10% wg PN-EN 14811+A1), a uzyskane wyniki pozostają na niższym poziomie, niż wartości przedstawione w atestacie. Analizując wyniki badań wytrzymałościowych zawartych w tablicy 3 wyraźnie widać, że materiał rodzimy szyn charakteryzował się bardzo dużą wytrzymałością na rozciąganie, wynoszącą ok. 1250 MPa, podczas gdy wytrzymałość na rozciąganie deklarowana przez producenta wg świadectwa odbioru 3812/2014 pozostaje na dużo niższym poziomie (ok. 933-948 MPa w zależności od wytopu). Podobnie uzyskane wyniki kształtują się w przypadku granicy plastyczności materiału. Norma wyrobu nie stawia żadnego wymagania odnośnie

Instytut Spawalnictwa Gliwice	Praca badawcza nr B-284/16	Strona/ stron 21/27
----------------------------------	-----------------------------------	------------------------

minimalnej wartości granicy plastyczności, natomiast uzyskane w badaniach wyniki wskazują, że granica plastyczności dla materiału rodzimego szyny ze złącza nr I wynosi średnio 841 MPa, a dla materiału rodzimego szyny ze złącza nr II wynosi ona średnio 815 MPa. Wartości te są również i w tym przypadku na wyższym poziomie, niż wartości przedstawione w atestcie materiałowym, gdzie wartość granicy plastyczności materiału, w zależności od wytopu, wynosi od 496-510 MPa.

Przytoczone powyżej wyniki badań mechanicznych jednoznacznie wskazują, że brak jest zgodności materiałowej dla stali R260 zarówno z przedstawionym atestem producenta jak również z normą wyrobu w zakresie minimalnej wartości wydłużenia. Tak duże różnice własności wytrzymałościowych i plastycznych oraz podwyższone, w stosunku do świadectwa odbioru nr 3812/2014, zawartości procentowe węgla, krzemu i manganu wskazują, że prawdopodobnie materiał podstawowy szyn nie jest w gatunku R260. Analizując dostępne rodzaje stali na szyny rowkowe przedstawione w tablicy 3a na str. 12 w normie PN-EN 14811+A1:2010 [1] wymagania odnośnie ich własności wytrzymałościowych i plastycznych, widać, że uzyskane wyniki badań w ramach tej pracy odpowiadają wymaganiom stawianym stali R340GHT. Dla gatunku R340GHT maksymalne zawartości pierwiastków chemicznych pozostają na takim samym poziomie jak dla stali R260, ale wymagania wytrzymałościowe i plastyczne są bardzo zbliżone do uzyskanych wyników (dla stali R340GHT: wytrzymałość na rozciąganie $R_{m \text{ min.}} = 1175$ MPa, wydłużenie $A_5 \text{ min} = 9\%$).

Oprócz własności wytrzymałościowych i plastycznych norma wyrobu podaje jeszcze wymagania co do twardości powierzchni roboczej główki szyny mierzonej metodą Brinella. Dla stali w gatunku R260 powinna się ona znajdować w zakresie 260 – 300 HBW, natomiast dla stali R340GHT powinna się ona znajdować w przedziale 340-390 HBW. W ramach niniejszej pracy nie badano bezpośrednio twardości na powierzchni roboczej główki szyn metodą Brinella, natomiast badano twardość metodą Vickersa na przekroju poprzecznym złącza spawanego w obszarze główki szyny. Wyniki tych pomiarów twardości przedstawiono w tablicy 9, a twardość materiału podstawowego na przekroju złącza w pobliżu powierzchni główki szyny reprezentują punkty 1-3 oraz 13-15 na linii pomiarowej A (tabl. 9). Średnia twardość materiału podstawowego szyn w badanych złączach wynosi ok. 350 HV10. Dla celów analizy dokonano konwersji twardości uzyskanej metodą Vickersa na twardość

Instytut Spawalnictwa Gliwice	Praca badawcza nr B-284/16	Strona/ stron 22/27
----------------------------------	----------------------------	------------------------

przedstawianą w skali Brinella zgodnie z normą PN-EN ISO 18265:2014 [7]. Średnia twardość 350 HV10 przekonwertowana na skalę Brinella wynosi ponad 330 HB, co również świadczy że twardość w obszarze powierzchni główki szyny nie odpowiada wymaganiom stawianym dla stali R260 lecz jest bliższa stali R340GHT.

Podczas badań twardości złączy spawanych, w związku z brakiem wytycznych określających maksymalne dopuszczalne wartości twardości złączy szyn tramwajowych spawanych termitowo przyjęto, że maksymalna dopuszczalna twardość na przekroju złącza spawanego nie powinna przekroczyć 380HV10 stanowiącym podstawowe kryterium spawalnicze. Maksymalny dopuszczalny poziom twardości określono w oparciu o normę PN-EN ISO 15614-1:2008 [9]. W analizowanych złączach próbnych w żadnym z badanych obszarów na przekroju złączy nie została przekroczona twardość 380HV10 (max. 377HV10).

Kolejnym z przeprowadzonych badań było badanie odporności na pękanie kruche materiału rodzimego szyn. Wyniki badań zestawione w tabelicy 5 pokazują, że uzyskana praca łamania jest na bardzo niskim poziomie i wynosi średnio ok. 10 J, gdzie zazwyczaj minimalna wartość pracy łamania materiału odpornego na kruche pękanie to 27J. Niskie wartości uzyskanej pracy łamania wskazują na brak odporności na kruche pękanie już w temperaturze pokojowej, a wszystkie przełomy uzyskane w badaniu to przełomy kruche. Jednakże i w tym przypadku brak jest wymagań normowych określających minimalną wymaganą wartość pracy łamania KV dla szyn tramwajowych rowkowych.

Badaniom metalograficznym makroskopowym i mikroskopowym zostały poddane fragmenty złączy nr I i nr II pobrane z obszaru pęknięcia, z obszaru główki szyny oraz z obszaru stopki. Badaniom podlegał materiał rodzimy, strefa wpływu ciepła (SWC) oraz metal spoiny. Badania prowadzono w celu ujawnienia niekorzystnych struktur (bainit, martenzyt) oraz ewentualnych niezgodności spawalniczych. Badania metalograficzne makroskopowe nie wykazały żadnych nieprawidłowości pod względem jakości złącza. Badania metalograficzne mikroskopowe wykazały, że główną strukturą w badanych obszarach złącza jest perlit i w żadnym z obszarów nie występują niekorzystne struktury hartownicze jak bainit i martenzyt, co również odzwierciedlają uzyskane wyniki pomiarów twardości na przekroju złączy. Badania metalograficzne mikroskopowe wykazały natomiast występowanie pęcherzy gazowych w spoinie zarówno w złączu nr I oraz

Instytut Spawalnictwa Gliwice	Praca badawcza nr B-284/16	Strona/ stron 23/27
----------------------------------	----------------------------	------------------------

nr II w obszarze główek szyn, w obszarze pęknięć złączy oraz w obszarze stopek szyn. Obecność pęcherzy gazowych świadczy o dużej dynamice procesu spawania termitowego i o niewystarczającym odgazowaniu ciekłego metalu spoiny, na co mogły mieć wpływ warunki technologiczne spawania (np. temperatura podgrzewania wstępnego, czas podgrzewania wstępnego).

Należy stwierdzić, że dostarczona przez Zleceniodawcę Instrukcja Technologiczna Spawania WPS T/TERM/01 (tabl. 11) jest niekompletna i nie zawiera tak istotnych danych jak np. czas i temperatura podgrzewania wstępnego, czas obciążenia nadlewów, warunków podgrzewania wstępnego jak ciśnienie propanu i tlenu oraz wysokość palnika.

Wymieniona w WPS norma EN ISO 15609:2004 „Specyfikacja i kwalifikowanie technologii spawania metali – Instrukcja technologiczna spawania” obejmuje kilka części dotyczących spawania łukowego (część 1), spawania wiązką elektronów (część 3), spawania wiązką promieniowania laserowego (część 4) i zgrzewania rezystancyjnego (część 5). W każdym z tych przypadków formularz instrukcji WPS wymaga podania numeru protokołu kwalifikowania technologii spawania (WPQR), opracowanego na podstawie wyników badań złączy wykonanych wg technologii spawania, której dotyczy dany WPS.

Instrukcje Technologiczne Spawania WPS powinny powstawać w oparciu o wyniki badań w procesie kwalifikowania/uznawania/sprawdzania technologii spawania. W tym przypadku brak jest informacji o tym czy wykonawca konstrukcji posiada protokoły z takich badań (np. Protokół Kwalifikowania Technologii Spawania WPQR), mających na celu potwierdzenie prawidłowości prowadzonego przez Wykonawcę termitowego spawania szyn tramwajowych, np. wg normy PN-EN ISO 15613:2006 [10] dotyczącej tzw. przedprodukcyjnego badania technologii spawania złączy nietypowych (dla celów niniejszej pracy takiej dokumentacji nie udostępniono). Wraz z dokumentacją dostarczono dokument pt.: „Warunki Techniczne Wykonania i Odbioru złączy szynowych 49E1, 60E1 spawanych termitowo, metodą SoWoS-P”, których autorem jest firma Rolf Plötz Polska Sp. z o. o. Odnoszą się one jednak do zupełnie innych złączy szynowych kolejowych o profilach 49E1 i 60E1 spawanych metodą SoWoS-P, a nie do złączy szyn tramwajowych rowkowych o profilu 60R2 spawanych metodą SRZ-LP (wg dostarczonego WPS).

Tablica 11. Instrukcja Technologiczna Spawania WPS stosowana przez Wykonawcę

Instrukcja spawania WPS T/TERM/01		FAUMER	
Oznaczenie procedury:		Instrukcja spawania zgodna z EN 14730-2:2006 w oparciu o EN ISO 15609:2004	
Spawanie szyn 60R2			
Nazwa metody:	Niniejszy dokument i ewentualne dane stanowią naszą własność i nie wolno ich bez naszej pisemnej zgody powielać ani udostępniać osobom trzecim.		
SRZ - LP			
Gatunek szyn	Kształty szyn:		
R260, R290 GHT, R340 GHT / HSH-M	Ri 59 / 59Ri1, Ri 60 / 60R1, Ri 60N / 60R2		
Luz spawalniczy :	Wznios : 1,3-1,8 mm		
<p>24 - 26 mm</p> <p>SL - wznios lewy SR - wznios prawy SL-SR - wznios musi być taki sam po obu stronach</p>			
Ustawienia:		Istotne czasy:	
Palnik do podgrzewania:	Palnik 22 otworowy	Czas podgrzewania:	
Mieszanka do podgrzewania:		Czas obciążenia nadlewów :	
		Szlifowanie zgrubne:	
Ciśnienie propan:			
Wysokość palnika:			
Uwagi do wykonania złącza :		Podgrzewanie końców szyn:	
<p>-Zaleca się zastosowanie luzu spawalniczego min. 25 mm</p> <p>-Stosować łagodny płomień podczas podgrzewania !</p> <p>-Kontrola wzrokowa równomiernego podgrzewania końców szyn!</p> <p>-Kontrola prawidłowego ustawienia palnika względem luzu spawalniczego !</p> <p>-Symetryczne ustawienie formy !</p>		<p>Prawidłowe</p>	<p>Nieprawidłowe</p>
		Data:	Podpis/Pieczęć
Sporządził:	Szymon Matusiak	01.12.2014	
Sprawdził:	Artur Knafel	01.12.2014	

Instytut Spawalnictwa Gliwice	Praca badawcza nr B-284/16	Strona/ stron 25/27
----------------------------------	-----------------------------------	------------------------

Podsumowując, można zakładać, że przyczyny wystąpienia pęknięcia w złączach spawanych są złożone i leżą przede wszystkim w wystąpieniu wysokich naprężeń w obszarze złącza. Naprężenia mogły być spowodowane niewłaściwymi warunkami spawania termitowego. Przypuszczalnie mogły również wystąpić dodatkowe naprężenia eksploatacyjne na torowisku sumując się z naprężeniami spawalniczymi i w rezultacie tworząc warunki do powstawania pęknięć.

Ponadto wyniki uzyskanych badań mechanicznych wskazują, że materiał podstawowy przedmiotowych złączy szyn nie odpowiada zakładanej w przedstawionej dokumentacji stali R260, co świadczy o nienależytej kontroli jakości. W związku z tym stosowanie niewłaściwego materiału, o dużo wyższych własnościach wytrzymałościowych oraz obniżonych własnościach plastycznych, w stosunku do zakładanej stali R260, bardzo niskiej odporności na kruche pękanie mogło się przyczynić do inicjacji pęknięcia w wymienionych wyżej warunkach.

Z przekazanych przez Zleceniodawcę informacji (e-mail z dnia 18.01.2016 r.) wynika, że problem pęknięcia szyn tramwajowych nie jest incydentalny (pęknięcie ok. 140 połączeń spawanych na odcinku 8 km torowiska). Naszym zdaniem konieczne jest kompleksowe podejście mające na celu opracowanie właściwej technologii spawania i jej przebadanie jak również ustalenie warunków kontroli i nadzoru prac spawalniczych na torowisku oraz warunków odbiorowych wykonanych złączy. W zakresie tych działań należałoby również przeanalizować rozwiązanie konstrukcyjne węzłów torowiska oraz warunki ich montażu.

5. Wnioski

Na podstawie wyników badań sformułowano następujące wnioski:

1. Materiał zastosowany do wykonania złączy nr I i nr II nie spełnia wymagań normy PN-EN 14811+A1:2010 w zakresie minimalnej wartości wydłużenia dla stali R260. Uzyskane wyniki badań w zakresie wytrzymałości na rozciąganie, granicy plastyczności oraz wydłużenia materiału znacznie różnią się od wyników podanych w świadectwie odbioru szyn nr 3812/2014. Skład chemiczny spełnia wymagania normy PN-EN 14811+A1:2010 dla stali R260 ale odbiega od składu podanego w świadectwie odbioru szyn nr 3812/2014.

Instytut Spawalnictwa Gliwice	Praca badawcza nr B-284/16	Strona/ stron 26/27
----------------------------------	----------------------------	------------------------

2. Wyniki badań, w zakresie własności wytrzymałościowych, plastycznych oraz składu chemicznego wskazują, że dostarczone do badań złącza szyn zostały wykonane ze stali R340GHT wg normy PN-EN 14811+A1:2010.
3. W analizowanych złączach spawanych szyn tramwajowych ujawniono występowanie w spoinach pęcherzy gazowych, których obecność mogła być spowodowana niewłaściwą technologią spawania powodującą zbyt szybkie stygnięcie ciekłego metalu termitowego.
4. Badania metalograficzne mikroskopowe w strefie pęknięcia i poza strefą pęknięcia nie wykazały obecności niekorzystnych struktur hartowniczych, co odzwierciedlają także wyniki pomiarów twardości (max. 377HV10).
5. Prawdopodobna przyczyna pęknięcia jest złożona i składa się na nią:
 - zastosowanie materiału szyn niezgodnego ze specyfikacją, o obniżonych własnościach plastycznych,
 - błędy technologii:
 - niewłaściwy nadzór na etapie wytwarzania złączy, o czym świadczy dostarczona niekompletna instrukcja technologiczna spawania WPS i brak przywołania w niej protokołu kwalifikowania technologii WPQR, a także porowatość spoin,
 - brak potwierdzonej technologii spawania metodą SRZ-LP oraz ewentualne niewłaściwie prowadzone czynności na torowisku mogące powodować niekorzystne naprężenia spawalnicze i eksploatacyjne.
6. Wykonawca powinien zwiększyć nadzór nad procesem spawania na wszystkich etapach jego realizacji, potwierdzić umiejętność wykonywania połączeń spawanych szyn tramwajowych rowkowych na podstawie badań technologii spawania np. wg normy PN-EN ISO 15613:2006 [10].

6. Normy powołane

- [1] PN-EN 14811+A1:2010. Kolejnictwo. Tor. Szyny specjalne. Szyny rowkowe i związane z nimi profile konstrukcyjne.
- [2] PN EN ISO 6892-1:2010. Metale. Próba rozciągania. Część 1: Metoda badania w temperaturze pokojowej.

Instytut Spawalnictwa Gliwice	Praca badawcza nr B-284/16	Strona/ stron 27/27
----------------------------------	-----------------------------------	------------------------

- [3] PN - EN ISO 148-1:2010. Metale. Próba udarności sposobem Charpy'ego. Część 1: Metoda badania.
- [4] PN EN ISO 17639:2013-12. Badania niszczące spawanych złączy metali. Badania makroskopowe i mikroskopowe złączy spawanych.
- [5] PN-EN 14587-1:2007. Kolejnictwo. Tor. Zgrzewanie iskrowe szyn. Część 1: Zgrzewanie nowych szyn ze stali gatunku R220, R260, R260Mn i R350HT w zgrzewalni.
- [6] PN-EN ISO 6507-1:2007. Metale. Pomiar twardości sposobem Vickersa. Część 1: Metoda badań.
- [7] PN-EN ISO 18265:2014. Metale. Konwersja wartości twardości.
- [8] PN-EN 14730-1+A1:2010. Kolejnictwo. Tor. Spawanie termitowe szyn. Część 1. Dopuszczenie procesów spawania.
- [9] PN-EN ISO 15614-1:2008. Specyfikacja i kwalifikowanie technologii spawania metali. Badanie technologii spawania. Część 1: Spawanie łukowe i gazowe stali oraz spawanie łukowe niklu i stopów niklu.
- [10] PN-EN ISO 15613:2006. Specyfikacja i kwalifikowanie technologii spawania metali. Kwalifikowanie na podstawie przedprodukcyjnego badania spawania/zgrzewania.

KONIEC