ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1995
Seria : TRANSPORT z. 27 Nr kol. 1295

Jerzy Dziubiński
Piotr Adamiec

WŁASNOŚCI ZŁĄCZY SZYN SPAWANYCH METODĄ T.I.M.E

Streszczenie. W pracy przedstawiono przegląd wymagań dotyczących własności mechanicznych takich, jak: twardość, wytrzymałość, współczynnik intensywności naprężeń K_{Ic}, prędkość pękania da/dN i wytrzymałość zmęczeniową obecnie produkowanych szyn. Opisano zalety i wady spawania metodą T.I.M.E oraz podano własności mechaniczne i strukturę złączy spawanych szyn tą metodą.

PROPERTIES OF RAIL JOINTS WELDED BY T.I.M.E METHOD

Summary. A review of requirements of mechanical properties that is hardness, strength, stress intensity factor K_{Ic}, crack growth rate da/dN and fatigue strength of nowadays manufactured rails has been presented. Advantages and defects of welding of rails by T.I.M.E method and mechanical properties and microstructure of welded joints of rails have been described.

1. WSTĘP

Zwiększenie prędkości pojazdów szynowych oraz wzrastające obciążenia powodują wzrost wymagań dotyczących odporności na ścieranie, własności wytrzymałościowych i wytrzymałości zmęczeniowej szyn. Wzrost wytrzymałości i odporności na ścieranie stali perlitycznych, powszechnie stosowanych na szyny, uzyskuje się poprzez zmniejszenie odległości między płytkami cementytu w perlicie, przy czym pożądane jest, aby odległość ta była równa ok. 0,1 μm, co wiąże się z koniecznością obniżenia temperatury przemiany perlitycznej do przedziału temperatur 550-600°C. Natomiast głównym czynnikiem wpływającym na inicjowanie pęknięć kontaktowo-zmęczeniowych jest występowanie łańcuszków wtrąceń tlenkowych w główce szyny. Gdy tzw. liczba Sugino określona jako suma długości łańcuszków tlenkowych na powierzchni 200 mm^2 przekracza 2 mm, to występują warunki do rozwoju pęknięć kontaktowo-zmęczeniowych [1].

Poniżej przedstawiono podstawowe wymagania stawiane szynom, zaczerpnięte z pracy [1].

Rozróżnia się trzy zakresy twardości uzyskiwane na powierzchni tocznej szyn uzyskiwane w zależności od składu chemicznego stali oraz od zastosowanego procesu technologicznego:

- 260÷360 HB stale węglowo-manganowe naturalnie chłodzone,
- 300÷350 HB stale niskostopowe naturalnie chłodzone oraz stale węglowo-manganowe po obróbce cieplnej,
- 350÷410 stale węglowo-manganowe i stale niskostopowe po obróbce cieplnej.

W chwili obecnej obserwuje się zapotrzebowanie głównie na szyny wysokowytrzymałe o twardości 320÷370 HB ($R_m \geq 1080$ MPa) i coraz większe zapotrzebowanie na szyny o twardości 350÷390 HB ($R_m \geq 1180$ MPa). Skład chemiczny szyn wysokowytrzymałych jest tak dobrany, aby twardość strefy wpływu ciepła w złączu zgrzewanym była porównywalna z twardością w obszarach główki szyny. Ponadto pojawia się wymaganie dotrzymania twardości na głębokość 20 mm pod powierzchnią toczną ze względu na poprawę wytrzymałości zmęczeniowej.

Jako kryterium odporności szyn na kruche pękanie przyjmuje się wartość współczynnika intensywności naprężeń $K_{Ic} \geq 32$ MPa $\sqrt{m}$ wyznaczonego zgodnie z ASTME 399.

Naprężenia wzdłużne w stopce szyn nie powinny przekraczać 260 MPa.

Jako kryterium wytrzymałości zmęczeniowej szyn przyjmuje się liczbę cykli do zniszczenia $N_f > 10^7$ określoną przy stałej amplitudzie odkształcenia 0,00135 zgodnie z ASTME 606.

Prędkość rozprzestrzeniania się pęknięcia zmęczeniowego da/dN nie powinna przekraczać następujących wartości: dla $\Delta K = 10$ MPa$\sqrt{m}$ - 9,7 m/Gc i dla $\Delta K = 15$ MPa$\sqrt{m}$ - 32,7 m/Gc lub dla $\Delta K = 15$ MPa $\sqrt{m}$ - 32,7 m/Gc i dla $\Delta K = 20$ MPa$\sqrt{m}$ - 77,6 m/Gc.

Wskaźnik K3 charakteryzujący stopień zanieczyszczeń wtrąceniami niemetalicznymi tlenkowymi oznaczonymi zgodnie z DIN 50602 powinien spełniać następujące wymagania: K3 < 10 dla 95% badanych próbek, K3 < 20 dla 5% badanych.

Odwęglenie powierzchni główki szyny ocenione głębokością zalegania siatki ferrytu nie powinno przekraczać 0,5 mm, a mikrostruktura szyn utwardzonych powinna być w pełni perlityczna.

Przedstawione powyżej wymagane własności szyn wysokowytrzymałych są wielkościami kryterialnymi, które należy również przyjąć dla złączy szyn spawanych i zgrzewanych. W pracy [2] przedstawiono wyniki badań szyn o $R_m = 1000$ MPa w stanie po walcowaniu na gorąco. Wyniki wskazują, że szyny te spełniają wyżej podane wymagania dotyczące K_{Ic}, da/dN oraz wytrzymałości zmęczeniowej. W pracy [2] nie badano jednak złączy zgrzewanych. W pracy [3] przedstawiono wyniki badań dotyczące szyn obrobionych cieplnie o $R_m > 1080$ MPa. Z badań tych wynika, że szyny spełniają wyżej podane wymagania dotyczące K_{Ic}, da/dN oraz wytrzymałości zmęczeniowej, a złącza zgrzewane tych szyn spełniają wymagania dotyczące K_{Ic} i wytrzymałości zmęczeniowej, natomiast nie spełniają wymagań dotyczących prędkości rozwoju pęknięcia zmęczeniowego da/dN.

2. ŁĄCZENIE SZYN METODAMI SPAWALNICZYMI

Najpopularniejszą metodą łączenia szyn jest zgrzewanie oporowe iskrowe zapewniające wysokie i powtarzalne własności złączy zgrzewanych. Przykładowo w byłym ZSRR przy stosowaniu iskrowego zgrzewania szyn zanotowano niewielką liczbę pęknięć w złączach wynoszącą podczas eksploatacji toru bezstykowego ok. 1,5 na 100 km toru, tzn. siedmiokrotnie mniej niż przy termitowym spawaniu szyn w torze [4].

Technologie oraz urządzenia do zgrzewania szyn są na świecie ciągle unowocześniane, co zapewnia dalszą poprawę jakości złączy spawanych. Warunki uzyskania poprawnych złączy zgrzewanych, jak i nieprawidłowości występujące w procesie zgrzewania przedstawiono w pracy [5].

Inną metodą łączenia szyn, zwłaszcza w torze jest metoda spawania termitowego opisana w pracy [4]. Jednakże niska jakość uzyskiwanych połączeń uzyskiwanych zmusza do poszukiwania nowych metod, z których największe nadzieje budzi metoda T.I.M.E, której istotę przedstawiono w pracy [4].

3. CHARAKTERYSTYKA I ZALETY SPAWANIA T.I.M.E

Metoda T.I.M.E jest odmianą metody spawania topliwą elektrodą w osłonie mieszanki gazowej Ar-He-CO_2-O_2. Przy spawaniu jest wykorzystywany łuk rotacyjny o częstości rotacji od 800 do 1000 Hz przy średnicy ok 15 mm, który umożliwia uzyskiwanie szerokich o dużym wtopieniu spoin, odmiennych od spoin o "palcowym" kształcie, typowych przy spawaniu MAG.

Typowa mieszanka gazowa zawierająca 65% Ar, 26,5% He, 8% CO_2 i 0,5% O_2 zapewnia szeroki zakres stabilnych parametrów, a w szczególności napięcia łuku od 42 do 46 V przy szybkości podawania drutu elektrodowego Ø 1,2 mm od 20 do 30 m/min i parametry takie gwarantują wydajności stapiania od 20 do 30 kg stopiwa na godzinę, przy zachowaniu możliwości uzyskania spoin bez wad, o poprawnych własnościach mechanicznych.

Reakcje metalurgiczne, w związku z obecnością CO_2 i wolnego tlenu prowadzą do niekorzystnego utleniania żelaza, co wymaga stosowania niskostopowych drutów elektrodowych z Mn i Si. W celu zapewnienia wytrzymałości stopiwa, np. przy spawaniu szyn, druty elektrodowe zawierają dodatkowo do ok. 0,5% Mo oraz do 2,5% Ni.

Procesy metalurgiczne przy spawaniu T.I.M.E umożliwiają uzyskiwanie spoin o zawartości tlenu poniżej 350 ppm O_2 oraz wodoru poniżej 2 ml/100 g stopiwa. Wartości te są wyraźnie niższe od zawartości gazów przy spawaniu MAG w CO_2 lub mieszankach gazowych.

Urządzenia do spawania T.I.M.E są zwykle prostownikami inwertorowymi o płaskiej charakterystyce, które muszą zapewniać precyzyjną regulację napięcia i prądu spawania, natomiast podajniki drutu elektrodowego powinny umożliwiać osiąganie bardzo dużych szybkości podawania drutu elektrodowego. Podajniki te są wyposażane w 6 rolek napędowych z łożyskami kulkowymi i silniki sterowane tachoprądnicami.

Wymagania te spełniają urządzenia firmy Fronius TIME 540 i TIME 760 łącznie z podajnikami TIME-51.

Do zalet metody spawania T.I.M.E w porównaniu do spawania MAG można zaliczyć:

- przechodzenie ciekłego metalu następuje całkowicie w słupie łuku,
- głębokie i równomierne wtopienie w krawędzie łączonych elementów,
- mniejsze odkształcenia i naprężenia złącza ze względu na mniejsze ilości ściegów i warstw,
- praktyczny brak rozprysków, co zmniejsza czasy czyszczenia dyszy i złączy oraz zwiększa wydajność spawania,
- dużą czystość metalurgiczna spoin oraz niskie zawartości gazów (O_2 i H_2) w spoinach, co zapewnia wysokie udarności i pozostałe własności mechaniczne.

Do wad metody T.I.M.E należy zaliczyć wszystkie niedoskonałości spawania MAG (np. hałas, promieniowanie ultrafioletowe, pory metali) oraz dodatkowo konieczność stosowania złożonej i drogiej mieszanki gazowej typu Ar+He+CO_2+O_2. Również koszt urządzeń

ogranicza stosowanie metody T.I.M.E do przypadków spawania dużych i grubych konstrukcji ze spoinami pachwinowymi. W tych przypadkach metoda pozwala ograniczyć czasy pomocnicze i per saldo uzyskać obniżenie kosztów spawania.

Może to mieć również miejsce w przypadku spawania szyn. Firma Fronius proponując wykorzystanie spawania T.I.M.E do łączenia szyn opracowała metodę RAILWELD [6]. Zalety tej metody to przede wszystkim:

- możliwość spawania szyn w torze,
- eliminacja obróbki cieplnej przed i po spawaniu,
- duża wydajność procesu łączenia szyn,
- stosowanie do łączenia szyn hartowanych konwencjonalnie i szyn z główkami hartowanymi,
- możliwość łączenia szyn kolejowych, tramwajowych itp. w całym zakresie stosowanych stali szynowych.

4. WŁASNOŚCI MECHANICZNE SPAWANYCH SZYN METODĄ T.I.M.E

Przy spawaniu T.I.M.E własności złącza szynowego zależą przede wszystkim od składu chemicznego drutu elektrodowego. Inne czynniki decydujące o strukturze spoiny, między innymi energia spawania, współczynnik przetopienia, szybkość chłodzenia są praktycznie wielkościami stałymi.

Typowe druty do spawania szyn metodą T.I.M.E są niskostopowymi drutami przeznaczonymi do spawania stali wysokowytrzymałych (tab. 1 i 2).

Tabela 1

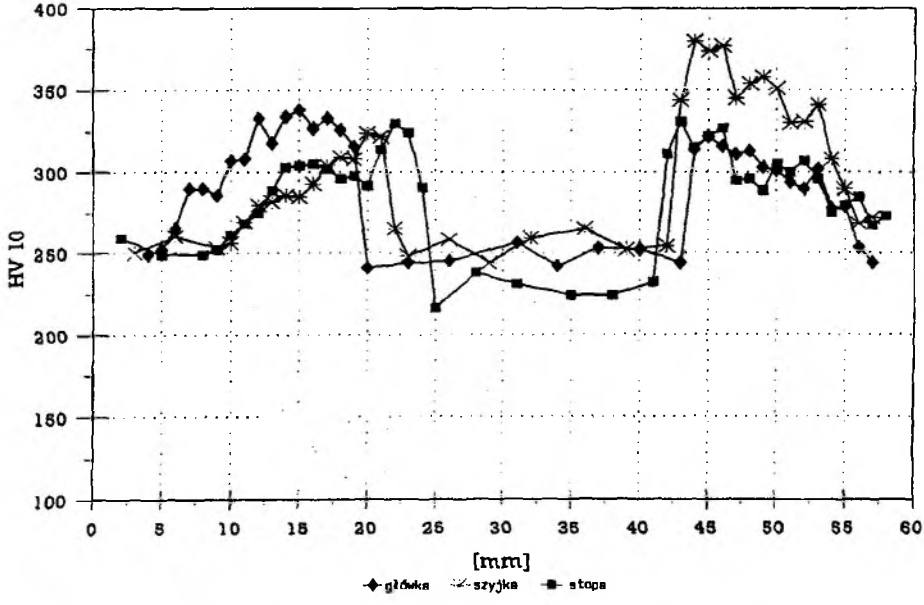
Druty wykorzystywane do spawania szyn metodą T.I.M.E. Oznaczenie drutu

	Skład chemiczny w %							Firma
	C	Mn	Si	Cr	Mo	Ni	Inne	
X70IG	0,1	1,6	0,6	0,3	0,25	1,0	V=0,10	Böhler
X90IG	0,1	1,75	0,6	0,3	0,45	0,45	-	Böhler
NiCrMo 90IG	0,1	1,8	0,6	0,3	0,6	1,95	-	Böhler
Carbofil NiMo1	0,1	1,8	0,6	-	0,4	1,0	Ti=0,15	Oerlikon
Carbofil NiMoCr	0,1	1,6	0,6	0,3	0,25	1,4	-	Oerlikon
S-NiMoCr	0,1	1,6	0,6	0,3	0,3	1,4	V=0,1	Kestra
S-2,5Ni	0,1	1,1	0,4	-	-	2,8	-	Kestra
OK Autrod 13.26	0,1	1,4	0,8	-	-	0,8	Cu=0,4	ESAB

Tabela 2

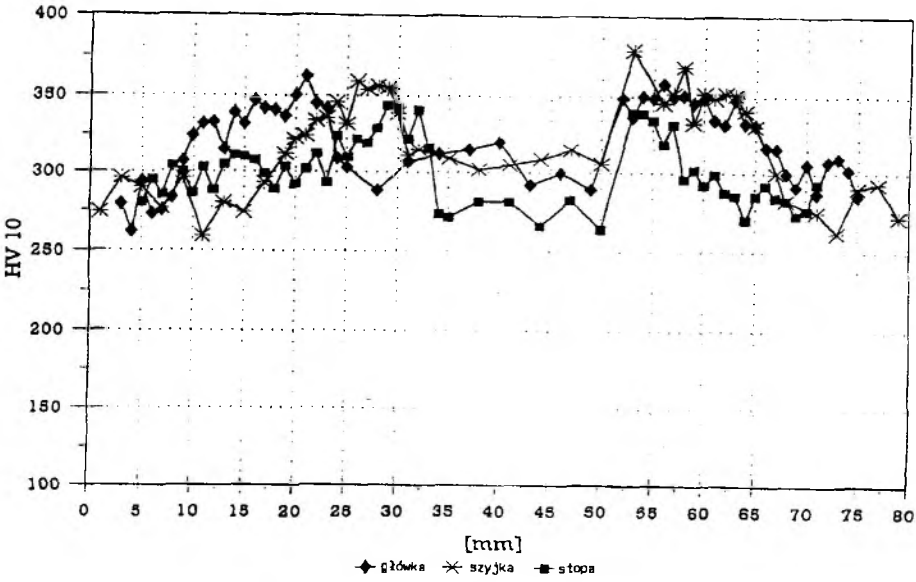
Własności mechaniczne stopiwa drutów do spawania szyn metodą T.I.M.E

Oznaczenie drutu	Własności mechaniczne					Uwagi
	R_e	R_m	A_5	Udarność kV, J		
	MPa	MPa	MPa	+20°C	-20°C	
X70IG	800	900	19	190	-	KV(-60°C)=45J
X90IG	915	960	20	130	-	KV(-60°C)=60J
NiCrMo 90IG	950	1010	18	100	-	
Carbofil NiMo1	> 640	710-780	> 18	> 100	> 80	
Carbofil NiMoCr	> 690	790-860	> 16	> 80	> 50	
S-NiMoCr	710	800	20	80		
S-2,5Ni	450	730	25	110		
OK Autrod 13.26	620	710	22	90	50	KV(0°C)=110J



Rys. 1. Rozkład twardości HV10 wzdłuż złącza spawanego szyn UIC-60 drutem elektrodowym X70-IG, [6]

Fig. 1. Hardness distribution in joint of UIC-60 rails, welded with X70-IG wire [6]



Rys. 2. Rozkład twardości HV10 wzdłuż złącza spawanego szyn UIC-60 drutem elektrodowym X90-IG, [6]

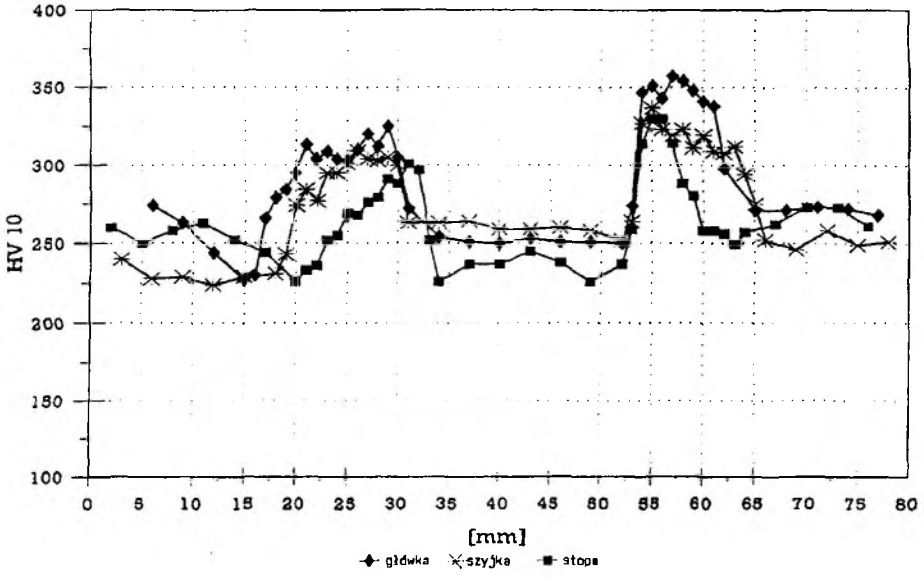
Fig. 2. Hardness distribution in joint of UIC-60 rails, welded with X90-IG wire [6]

Mając na uwadze skład chemiczny szyn (C=0,5÷0,8%, Mn=0,6÷1,7%) oraz udział materiału szyny w spoinie, który wynosi od 0,3÷0,4, w spoinach wykonanymi drutami podanymi w tabl.1 obserwuje się praktycznie tylko wzrost zawartości węgla zgodnie z równaniem:

$$C_{sp} = (0{,}3 \div 0{,}4) \cdot C_{sz} + (0{,}6 \div 0{,}7)\, C_d$$

do wartości C_{sp} = 0,25÷0,35%. Wzrost zawartości C w stosunku do zawartości w stopiwie drutów elektrodowych prowadzi do wzrostu wytrzymałości złączy szynowych. Badania firmy FRONIUS [6] przedstawiają rozkład twardości HV10 w przypadku spawania T.I.M.E szyn w gatunku UIC-60 i R65 drutem elektrodowym X70IG firmy Böhler (rys. 1 i 2) oraz szyn UIC-60 drutem X90IG firmy Böhler.

Zastosowanie drutu X70IG pozwala uzyskać własności spoin na poziomie własności szyn (rys. 1 i 2). W przypadku tym obserwuje się utwardzenie w strefie wpływu ciepła, gdzie twardość przewyższa ok. 100 HV twardość szyny i spoiny. Podobne zjawisko obserwowane jest w przypadku zastosowania do spawania drutu X90IG (rys. 3). W złączach szynowych spawanych metodą T.I.M.E nie obserwuje się praktycznie twardości przewyższających wartość 370 HV. Jest to wynikiem specyficznych warunków układania poszczególnych ściegów składających się na spoinę. Układanie ściegów prowadzi z jednej strony do podgrzewania wstępnego obszaru spawania, a z drugiej do obróbki cieplnej dla ułożonych już ściegów.



Rys. 3. Rozkład twardości HV10 wzdłuż złącza szynowego szyn R65 drutem elektrodowym X70-IG. [6]

Fig. 3. Hardness distribution in joint of R65 rails, welded with X70-IG wire [6]

5. MIKROSTRUKTURA ZŁĄCZA SZYNOWEGO

Skład chemiczny szyn, a w szczególności zawartość węgla (C = 0,6÷0,8%) powoduje ograniczoną spawalność, a przy ich spawaniu wymagane jest zwykle podgrzewanie wstępne od 300÷500°C. Przy metodzie RAILWELD [6] wykorzystuje się technikę spawania wielowarstwowego, która umożliwia utrzymanie punktów strefy wpływu ciepła w zakresie temperatur pomiędzy temperaturą początku przemiany martenzytycznej a temperaturą końca przemiany austenitycznej. Sposób ten ogranicza do minimum przegrzanie strefy przyspoinowej i eliminuje zarazem pęknięcia zimne w tej strefie, co umożliwia niski poziom wodoru dyfundującego przy spawaniu T.I.M.E. (poniżej 2 ml/100 g stopiwa). W przegrzanej strefie przyspoinowej, której wielkość nie przekracza 5 mm, obserwuje się strukturę bainityczno-martenzytyczną o twardości ok. 350 HV. Dalsze odcinki strefy wpływu ciepła posiadają dobrą strukturę perlityczną z niewielką ilością ferrytu. W spoinach obserwuje się przekrystalizowane struktury typu baintycznego [6], w których wyróżnić można dużą zawartość ferrytu drobnoiglastego (acicular ferrite).

Badania metalograficzne makro- i mikrostopowe nie wykazały obecności pęknięć w szynowych złączach spawanych metodą T.I.M.E.

6. UWAGI KOŃCOWE

Metoda spawania T.I.M.E umożliwia spawanie montażowe w torach szyn kolejowych i tramwajowych we wszystkich gatunkach produkowanych w Polsce. Uzyskane połączenia spawane są bez pęknięć i posiadają własności zbliżone do własności szyn i cechują się one korzystną strukturą typu bainitycznego w spoinach oraz bainityczno-martenzytyczną w strefie wpływu ciepła, przy czym twardości złącza nie przekraczają wartości 370 HV. Technika wielowarstwowego spawania szyn umożliwia uzyskanie spoin w czasie 7÷12 minut, przy niższych kosztach i wyraźnie wyższych własnościach użytkowych w porównaniu do spawania termitowego.

Próby spawania szyn metodą T.I.M.E są aktualnie prowadzone w Instytucie Transportu Politechniki Śląskiej. Spawane będą wysokowytrzymałe szyny o wytrzymałości $R_m \geq 1080$ MPa, a kryterium przydatności metody obejmować będzie również własności związane z mechaniką pękania, m.in. współczynnik intensywności naprężeń K_{Ic}, szybkość pękania da/dN oraz liczbę cykli do zniszczenia N_f.

Literatura

[1] Kuziak R. i in.: Produkcja szyn wysokowytrzymałych. Materiały XIV Konf. N-T "Produkcja i Eksploatacja Szyn Kolejowych", Rogoźnik, X, 1994, s.178-196.
[2] Maciosowski A. i in.: Stal na szyny o wytrzymałości 1000 MPa w stanie po walcowaniu na gorąco. Materiały XIV Konf. N-T "Produkcja i eksploatacja szyn kolejowych" Rogoźnik, X, 1994, s.197-214.
[3] Dziubiński J.: Fatigue failure criterion based on plastic strain energy density applied to welds. Int.Journal of Fatigue vol. 13, No 3, 1991, p.223-226.
[4] Szljapin W.B. i in.: Swarka żeleznodorożnych relsow. Transport, Moskwa 1977.
[5] Dziubiński J., Adamiec P.: Techniki łączenia szyn kolejowych. Materiały XIV Konf. N-T "Produkcja i eksploatacja szyn kolejowych" Rogoźnik, X, 1994, s.100-109.
[6] Materiały firmy FRONIUS, Railweld Technische Dokumentation.

Recenzent: prof. Edmund Stasiak

Wpłynęło do redakcji: 10.07.1995 r.

Uwaga: Autorzy dziękują firmie Polweld za udostępnienie materiałów na temat metody Railweld.

Abstract

A review of requirements of mechanical properties that is hardness, strength, stress intensity factor K_{Ic}, crack growth rate da/dN and fatigue strength of nowadays manufactured rails has been presented. Requirements of mechanical properties are as follows: stress intensity factor $K_{Ic} \geq 32$MPa $\sqrt{m}$, number of cycles to failure determined with constant strain amplitude 0.00135 - $N_f > 10^7$, crack growth rate da/dN should not exceed value for $\Delta K = 10$ MPa$\sqrt{m}$ - 9,7 m/Gc and for $\Delta K = 15$ MPa$\sqrt{m}$ - 32,7 m/Gc or for $\Delta K = 15$ MPa $\sqrt{m}$ - 32,7 m/Gc and for $\Delta K = 20$ MPa$\sqrt{m}$ - 77,6 m/Gc.

Advantages and defects of welding of rails by T.I.M.E method and mechanical properties and microstructure of welded joints of rails have been described. Joints welded by T.I.M.E method have properties as follows: mechanical properties are equal with mechanical properties of rails, there are no cracks in joints, microstructure of weld is bainitic one and of heat affected zone is bainitic - martensitic one, hardness of joint does not excees 370 HV (Fig. 1-3). Multilayer T.I.M.E welding technique with alloyed wires (tabl. 1,2) enables to obtain joints in 7-12 min, with lower costs and better properties in comparison with thermit welding.