

S.I. KUCHUK-YATSENKO  
A.V. DIDKOVSKY  
V.I. SHVETS  
E.V. ANTIPIIN  
P. WOJTAS  
A. KOZŁOWSKI

## Zgrzewanie doczołowe iskrowe szyn o wysokiej wytrzymałości

*W artykule opisano wyniki badań w zakresie spawania szyn o wysokiej wytrzymałości. Zakres tych badań obejmował nie tylko monitorowanie samego procesu, lecz także ocenę uzyskanych rezultatów. Wynikiem badań są także rekomendacje sposobu prowadzenia robót.*

Słowa kluczowe: *spawanie, szyny, analiza wytrzymałości, zgrzewanie doczołowe iskrowe.*

### 1. WPROWADZENIE

Przez ostatnie lata szyny typu R260 i R350HT o wysokiej wytrzymałości montowane były na torach kolejowych w Polsce. Zgodnie z umową pomiędzy kolejami polskimi, PJSC Zakładem Produkcji Elektrycznego Sprzętu Zgrzewającego Kachowka (PJSC KZESO) oraz Instytutem Zgrzewania Elektrycznego E.O. Paton (PWI), sprowadzono do Polski stacjonarne maszyny spawalnicze K1000 oraz kompleksy mobilne (na podwoziach pojazdów MAZ i Tatra lub na podwoziach kolejowych mobilnych maszyn do zgrzewania szyn) wyposażone w maszyny K922-1.

Instytut Zgrzewania Elektrycznego E.O. Paton współpracuje z PJSC KZESO od ponad 50-ciu lat. Maszyny do zgrzewania szyn, zaprojektowane przez Instytut, są produkowane przez PJSC KZESO od wielu lat. Oprócz tego opracowano technologię przemysłową zgrzewania szyn R260 i R350HT o wysokiej wytrzyma-

łości za pomocą tych maszyn. Aby zrealizować te prace, serie wspomnianych wyżej szyn dostarczono do PWI i KZESO. Skład chemiczny stali szynowej i jej własności mechaniczne podano w tabeli 1. PWI współpracuje z Instytutem Technik Innowacyjnych EMAG od 2015 roku, a KZESO jest reprezentowane na polskim i europejskim rynku przez KZESO Machinery z siedzibą w Katowicach, w zakresie handlu i produkcji.

Zgrzewanie szyn przeprowadzono w fabryce, przy użyciu maszyny spawalniczej K922-1. Zgrzewaniu poddano dwie serie szyn R260 i R350HT. Wstępnie, przeprowadzono badanie zgrzewalności tych szyn oraz badania metalograficzne. Testy zgrzewanych szyn przeprowadzono w zgodzie z wymaganiami normy europejskiej [4]. Zespawane styki ze wszystkich serii były monitorowane za pomocą testów nieniszczących (metod ultradźwiękowych i kapilarnych). Przetestowano je również w zakresie statycznego zginania mechanicznego w zgodzie z wymaganiami tejże normy.

**Tabela 1**

**Skład chemiczny stali szynowej**

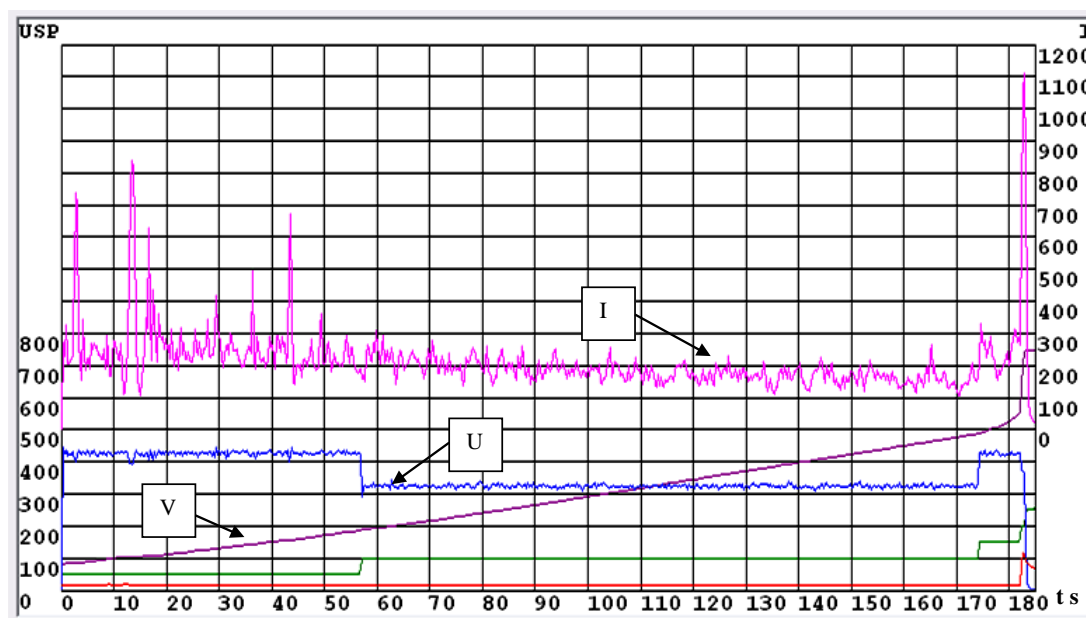
Typ stali	Skład chemiczny, %								
	C	Mn	Si	V	Ti	Cr	P	Al	S
R260	0,62...0,82	0,70...1,20	0,15...0,58	0,03	–	0,15	0,025	0,004	0,025
R350HT	0,72...0,82	0,70...1,20	0,15...0,58	0,03	–	0,15	0,020	0,004	0,025

Badania metalograficzne zgrzewanych styków, zgodnie z zamówieniem KZESO MACHINERY Ltd., przeprowadzono w Instytucie Zgrzewania Elektrycznego E.O. Paton na mikroskopie optycznym Neophot 32. Natomiast badania fraktograficzne i mikroanalizę widmową RTG pękniętej powierzchni zrealizowano za pomocą mikroskopy Auger JAMP 9500F autorstwa japońskiej firmy JEOL. Celem przeprowadzonych prac było opracowanie technologii przemysłowej do zgrzewania szyn R260 i R350HT o wysokiej wytrzymałości, tak aby odpowiadały one normie europejskiej oraz zapewnienie stabilnej jakości styków spawanych różnych typów stali bez konieczności zmian w trybie zgrzewania.

W Polsce technologie i sprzęt do zgrzewania szyn R260 niehartowanych cieplnie, opracowane przez PWI, stosowane są od wielu lat. W tym przypadku używa się

technologii zgrzewania doczołowego iskrowego ciągłego. Ta technologia charakteryzuje się zmniejszonym poborem energii, zapewnia jednolite nagrzewanie szyn na całym przekroju poprzecznym oraz stałe powtarzanie ustalonych cykli zgrzewania. Wiele lat stosowania tej technologii, w różnych warunkach, wykazało stałą i wysoką jakość styków spawanych na szynach niehartowanych cieplnie. Dlatego wstępne testy zgrzewania szyn R350HT przeprowadzono w trybach kanonicznych akceptowanych przy ciągłym zgrzewaniu doczołowym iskrowym.

Program zgrzewania ciągłego podano na rysunku 1, a pole temperatury w strefie wpływu ciepła odpowiadające temu trybowi pokazano na rysunku 2, krzywa 1. Wyniki testów zginania statycznego zawarto w tabeli 2.

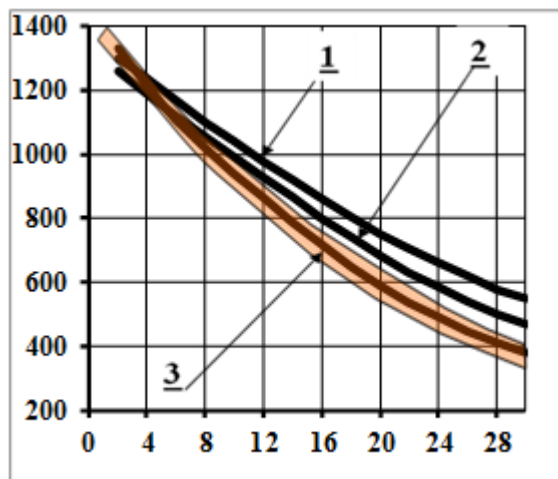


Rys. 1. Programy do zmiany głównych parametrów  $U$ ,  $I$ ,  $V_f$  podczas zgrzewania szyn R65 z zastosowaniem zgrzewania ciągłego.

Tabela 2

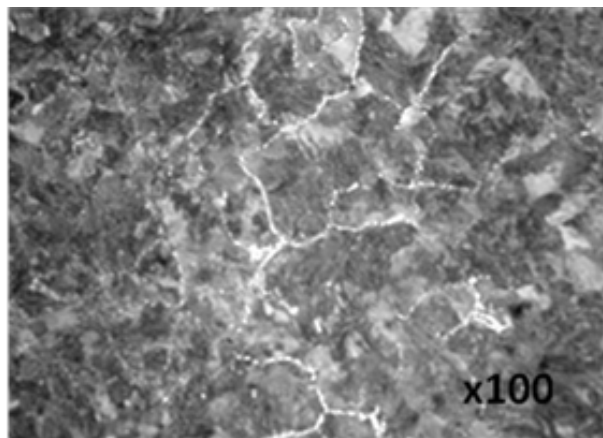
### Wyniki testów mechanicznych na zginanie statyczne

Numer trybu	Typ szyny	Obciążenie pęknięcia, kN	Odchylenie zginania, mm	Uwagi
Wymagania TS	Ukraina	160	$\geq 30$	TS U 24.1-40075815-002:2016
	Norma europejska	160	$\geq 20$	EN 14587-1:2007 E
1.	R350HT	$\frac{1800-2500}{2100}$	$\frac{14-30}{18}$	CF
2.	R350HT	$\frac{1700-2250}{1900}$	$\frac{12-22}{16}$	CF
5.	R350HT	$\frac{2770-3050}{3000}$	$\frac{58-66}{60}$	PF



Rys. 2. Rozkład temperatur w strefie wpływu ciepła przed zgrzewaniem oporowym podczas zgrzewania szyn R65 w różnych trybach: 1 zgrzewanie ciągłe w trybie kanonicznym; 2 zgrzewanie ciągłe przy niskim poziomie dostarczanego ciepła; 3 zgrzewanie pulsacyjne przy optymalnym poziomie dostarczanego ciepła

Wartości z testów styków spawanych na szynach R350HT, dotyczące obciążenia pęknięciem, są bliskie wartościom standardowym, podczas gdy wartości własności plastycznych są niestale i przeważnie niższe niż wymagania specyfikacji technicznych. Rysunek 3 pokazuje mikrostrukturę styków (środek spawu). W środku spawu można zobaczyć gruboziarnistą (ziarno nr 2-3) perlitowo-sorbitolową strukturę z wytrąconym ferrytem wzdłuż granic ziaren austenitu.



Rys. 3. Mikrostruktura w centrum styku spawanego podczas zgrzewania ciągłego

Z doświadczeń zdobytych podczas zgrzewania doczołowego iskrowego stali szynowych [7] wynika, że obecność takiej struktury w spawach ma negatywny wpływ na wartości wielkości mechanicznych spawów, zwłaszcza na plastyczność. W pracach [6,7] pokazano, że redukcja pobranej energii w zgrzewaniu takich stali pozwala udoskonalić strukturę metalu wzdłuż linii spawu.

Serie próbek poddano zgrzewaniu ciągłemu, lecz przy niższym poborze energii z powodu redukcji czasu iskrzenia (Rys. 2, krzywa 2). Podczas testowania próbek tej serii na zginanie, uzyskane wartości odchylenia były niestabilne (tabela 2, tryb 2), co było spowodowane powstaniem błędów doczołowych w płaszczyźnie spawu, zdefiniowanych w zgrzewaniu doczołowym iskrowym, jako „matowe punkty” (Rys. 4).

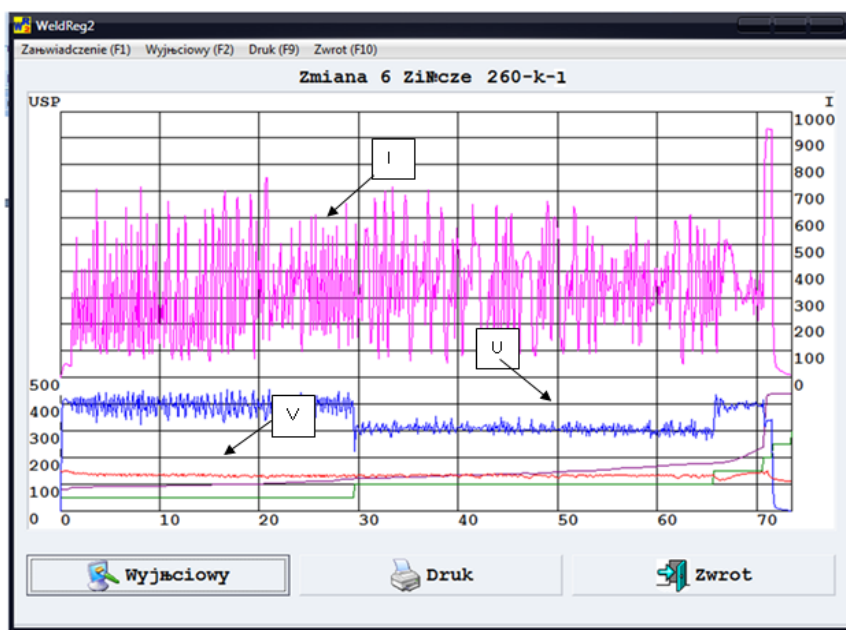


Rys. 4. Matowe punkty na pękniętej powierzchni styku spawanego

Mają one formę cienkiego filmu tlenowego o grubości 10  $\mu\text{m}$ . Ich skład zawiera w większości tlenki elementów mieszających się niemetalicznych składników zawartych w podstawowym metalu szyn. W większości standardów, takie miejsca o małych rozmiarach są akceptowane, jeżeli ich łączna powierzchnia pęknięcia nie przekracza 30  $\text{mm}^2$ .

Uznaje się, że występowanie takich wad oznacza potrzebę modyfikacji technologii zgrzewania. Dłate-

go przeprowadzono dalsze eksperymenty ze zgrzewaniem szyn R260 i R350HT przy pomocy zgrzewania doczołowego iskrowego pulsacyjnego [8]. Podobnie jak przy zgrzewaniu ciągłym, wszystkie parametry zgrzewania pulsacyjnego zostały wcześniej ustalone przez programy zmiany napięcia, prądu i szybkości iskrzenia w funkcji czasu lub przesunięcia (Rys. 5).



Rys. 5. Program do zmiany głównych parametrów zgrzewania

Jednocześnie, poprzez kontrolę wartości natychmiastowych tych parametrów w procesie iskrzenia, można wstrzymać, w dużym stopniu, pęknięcie w formie eksplozji styku powstające między częściami stykowymi oraz przesunąć je do procesu topnienia.

W tym przypadku wydajność czynnika procesu iskrzenia znacznie się zwiększa, prąd iskrzenia jest 2-3 razy większy, a możliwości zróżnicowania dostaw energii podczas zgrzewania znacznie się poszerzają.

W szczególności, zapewnia to elastyczność w nagrzewaniu warstw metalu w sąsiedztwie styków zgrzewanych części do poziomu temperatury wymaganego do uzyskania jakości zgrzewania na minimalnej szerokości strefy wpływu ciepła. Krzywe charakteryzujące rozkład temperatury na tym obszarze, podczas zgrzewania ciągłego i pulsacyjnego, przedstawiono na rys. 2.

W obu przypadkach sąsiadujące ze stykami warstwy są podgrzane do temperatury powyżej 1200°C, lecz gradient pola temperatury podczas zgrzewania pulsacyjnego jest znacznie wyższy i tym sposobem przyczynia się do utworzenia drobnoziarnistej struktury w środku spawu. Dodatkowo, zastosowanie zgrzewania pulsacyjnego daje nowe możliwości

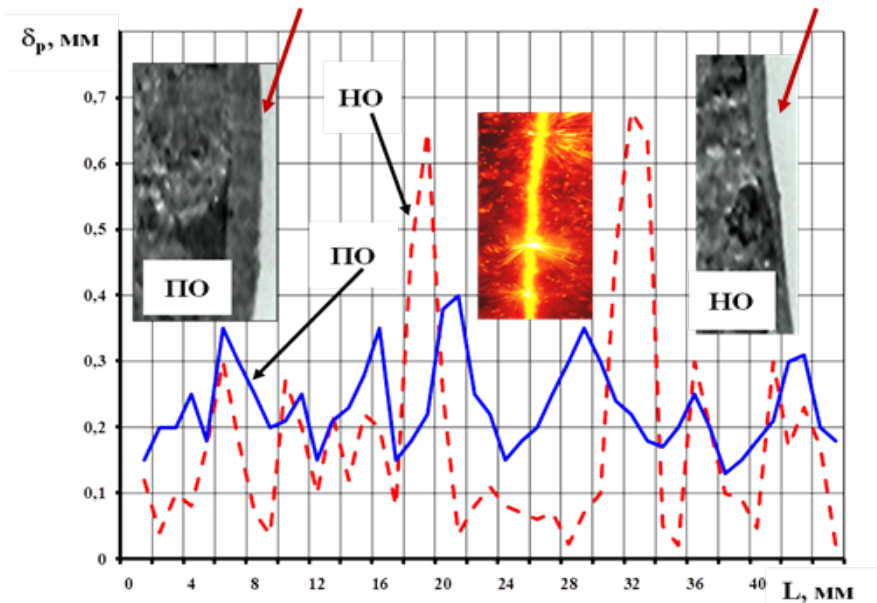
w zakresie zapobiegania wadom typu „matowe punkty” przy zgrzewaniu o obniżonym poborze energii.

W pracy [5] pokazano, że im wyższe jest prawdopodobieństwo powstania filmów tlenkowych typu „matowe punkty” w płaszczyźnie styku, tym mniejsza jest grubość stopienia na powierzchni poddanej iskrzeniu. Jak widać na porównaniu wykresów na rys. 6, stopienie przy zgrzewaniu pulsacyjnym ma stabilniejszą wartość niż przy zgrzewaniu ciągłym, jego wartości minimalne są 2-3 razy większe. Dlatego wydaje się być możliwym użycie ciągłego trybu zgrzewania charakteryzującego się minimalnym wkładem energii bez ryzyka pojawienia się wad typu „matowe punkty” na płaszczyźnie spawu.

Główne badania przeprowadzono na próbkach szyn R350HT o wysokiej wytrzymałości. Na tej podstawie określono optymalny tryb zgrzewania pulsacyjnego, ustalony wcześniej przez program (Rys. 5) oraz rozkład temperatury w strefie wpływu ciepła, krzywa 3 na rysunku 2. W takim trybie nagrzewania zgrzewanie trwa 70-80 sekund (Rys. 5). Oznacza to, że jest zredukowane trzy razy w porównaniu z trybem kanonicznym zastosowanym do szyn niehartowanych cieplnie (Rys. 1). Średnia energia topnienia wzrasta

dwa razy, lecz maksymalne krótkotrwałe zużycie energii pozostaje na tym samym poziomie jak podczas zgrzewania nieciągłego, tak więc przy użyciu

zgrzewania pulsacyjnego nie ma potrzeby stosowania źródeł energii z maszyn zgrzewających szyny.



Rys. 6. Rozkład topnienia na powierzchni przy zgrzewaniu pulsacyjnym (PF) i iskrowym ciągłym (CF)

Podczas badań wykazano, że uzyskanie wymaganych własności mechanicznych styków podczas zgrzewania szyn R260 możliwe jest przy tym samym wkładzie energii jak w szynach R350HT. Dlatego serie referencyjne szyn R260 i R350HT były zgrzewane w tym samym trybie. Każda seria składała się z 10 próbek o długości 1,22 m, ze stykiem w środku. Zgrzewane próbki, umieszczone na podstawach w odległościach 1 m, przetestowano w zakresie zginania statycznego, aplikując ciężar na środku spawu zgodnie ze standardem europejskim [4].

Po mechanicznej obróbce spawów wszystkie próbki przetestowano pod względem kapilarnym i ultradźwiękowym. Wyniki testów na zginanie zawarto

w tabeli 3. Testowane próbki charakteryzują się dużą wytrzymałością i plastycznością. Serie szyn R260 nie pękły podczas testów, a obciążenia były na poziomie wartości podstawowych metalu. Dlatego wykonano nacięcie w środku spawu, a próbki zostały doprowadzone do pęknięcia w celu sprawdzenia defektów wzdłuż linii połączenia. W seriach próbek szyn R350, 100% próbek pękło na spawach, a obciążenia i odchylenie zginania znacznie przekroczyły ustalone wymagania. W pęknięciach próbek nie zauważono defektów. We wszystkich testowanych próbkach serii referencyjnych nie stwierdzono defektów po testach kapilarnych i ultradźwiękowych.

Tabela 3

### Wyniki testów mechanicznych na zginanie statyczne

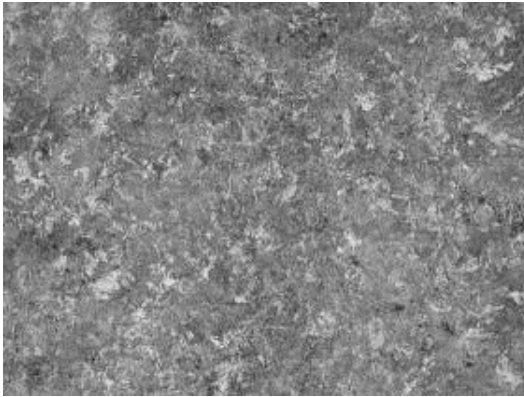
Lp.	Oznaczenia zgrzewanych końcówek	Obciążenie, κN	Zginanie, mm	Wyniki testu
1.	260-κ-2	2440	46	Brak pęknięcia
2.	260-κ-4*	2430	47	Brak pęknięcia
3.	260-κ-5*	2440	48	Brak pęknięcia
4.	260-κ-6*	2445	49	Brak pęknięcia
5.	260-κ-7*	2380	44	Brak pęknięcia
6.	260-κ-16	2250	37	Brak pęknięcia
7.	260-κ-17	2480	48	Brak pęknięcia
8.	260-κ-18	2380	45	Brak pęknięcia
9.	260-κ-20	2410	46	Brak pęknięcia
10.	260-κ-21	2380	43	Brak pęknięcia
11.	350-κ-11	2700	58	Pęknięcie
12.	350-κ-12	3050	66	Pęknięcie
13.	350-κ-13	3000	64	Pęknięcie
14.	350-κ-14	3000	58	Pęknięcie
15.	350-κ-15	3050	63	Pęknięcie

Analiza mikrostruktury w środku spawu i w strefie wpływu ciepła (rys. 7) pokazuje, że rozmiar ziaren jest mniejszy 2-3 razy, a poziom ferrytu obniżył się znacznie w stosunku do danych z rys. 3 pokazanych

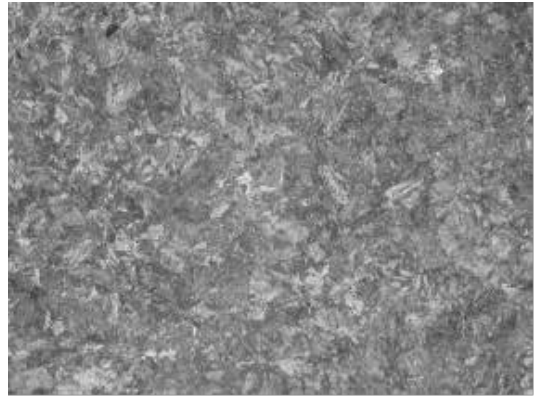
dla zgrzewania ciągłego. Struktura w środku spawu i w sąsiednim obszarze strefy wpływu ciepła pozostaje sorbitolowo-perlitowa i sorbitolowa, nie ma żadnych niebezpiecznych twardniejących struktur.

powiększenie  
X100

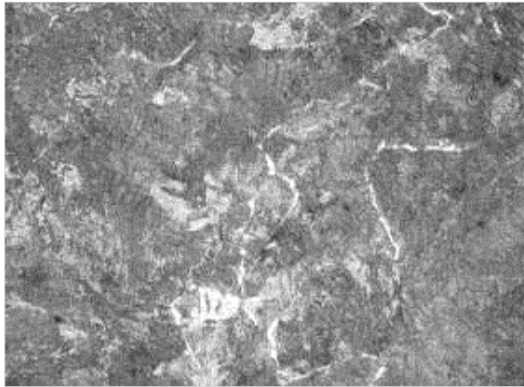
szyna R350HT



szyna R260



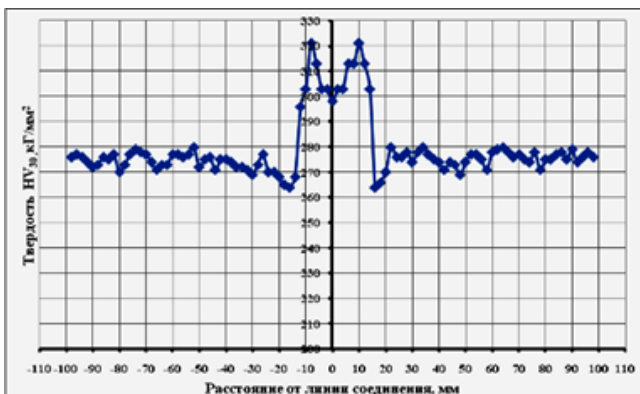
X400



Rys. 7. Mikrostruktura spawu w strefie wpływu ciepła

Rysunek 8 przedstawia wyniki pomiarów twardości na stykach serii referencyjnych. Pomiarów dokonano na głębokości 5 mm od powierzchni toczonej główki szyny. W szynach R350HT twardość zmniejsza się w określonych obszarach strefy na długości 1-2 mm, tam gdzie ogrzewanie osiągnęło poziom hartowania stali. W środku natomiast, z powodu zmniejsze-

nia zawartości węgla w warstwach metalu sąsiadujących ze stykiem zgrzewanym, poddanym ogrzewaniu o wartościach temperatur bliskich topnieniu stali, struktura hartowanego sorbitolu o wysokich własnościach plastycznych została zaobserwowana na obszarach o zmniejszonej twardości.



Rys. 8. Wykres rozkładu twardości HV30 w stykach spawanych szyn: R 260 (z lewej), R 350HT (z prawej)

Długość tych obszarów nie przekracza 2 mm, tak więc nie może to mieć negatywnego wpływu na zużycie styków przy kontakcie między szyną a kołami pociągu.

Na stykach zgrzewanych szyn R260 zaobserwowano 23-procentowy wzrost twardości w strefie wpływu ciepła w porównaniu z metalem podstawowym. Struktura metalu w tym obszarze to sorbitol o ziarnach w rozmiarze 3-4 (rys. 7b) oraz sorbitol twardniejący. Taki wzrost jest dopuszczalny według wymagań z [9]. Wzrost został spowodowany szybkim wychładzaniem się strefy wpływu ciepła podczas zgrzewania w trybie sztywnym. Podczas badań określono również ograniczające dopuszczalne odchylenie od optymalnej wartości dostarczonej energii (zaznaczony obszar krzywej 3, rys. 2), przy którym można uzyskać wymagane wartości testów mechanicznych styków zgrzewanych. Należy zauważyć, że podane limity dostarczonej energii oparte są na wieloletnim doświadczeniu w zastosowaniu technologii zgrzewania pulsacyjnego podczas zgrzewania szyn o wysokiej wytrzymałości na liniach kolejowych Ukrainy, Rosji i innych państw. Dalsze doświadczenia zdobyte podczas stosowania tej technologii do zgrzewania szyn R260 i R350HT o wysokiej wytrzymałości pozwalają określić warunki brzegowe. W procesie zgrzewania testowanych próbek przy poborze energii mniejszym niż określone limity, wzrost twardości zgrzewanych styków szyn R260 i R350HT zaobserwowano wraz ze wzrostem wytrzymałości i plastyczności. Przy wzroście dostarczonej energii, zmniejszenie twardości w strefie wpływu ciepła oraz w wytrzymałości i plastyczności styków przejawiało się w większym stopniu.

Przeprowadzone badania pokazują, że podczas zgrzewania szyn R260 i R350HT o wysokiej wytrzymałości można uzyskać wysokie wartości własności mechanicznych zgrzewanych styków poprzez zachowanie podstawowych warunków, tzn. znaczne zmniejszenie pobieranej energii w porównaniu do technologii akceptowalnych przy zgrzewaniu szyn nieutwardzonych. Jednocześnie, zakres akceptowalnych odchyleń w zakresie poboru energii został zawężony w stosunku do wartości wcześniej ustalonej. Określa to liczbę zwiększonych wymagań wobec systemów automatycznej kontroli procesów zgrzewania, zapewniając dokładność odtworzenia wcześniej ustawionych programów zgrzewania, jak też dokładność przygotowania końcówek szyn przed zgrzewaniem, które polega na oczyszczeniu powierzchni styku z dostarczającym prąd elektrodami.

W Instytucie Zgrzewania Elektrycznego E.O. Patton (PWI) zdobyto wiele doświadczeń związanych

z zastosowaniem technologii zgrzewania pulsacyjnego szyn o wysokiej wytrzymałości od różnych producentów, na liniach kolejowych Ukrainy, Rosji, Wspólnoty Niepodległych Państw, Chin i Stanów Zjednoczonych, gdzie używane są maszyny zgrzewające zaprojektowane przez PWI. Maszyny te stosują systemy do wewnątrzprocesowego monitorowania parametrów ustawionych wcześniej przez programy sterowania procesem. Po zakończeniu zgrzewania każdego czoła, komputerowy system sterowania rejestruje wszystkie dane o zmianach parametrów, porównuje je z wcześniej ustawionymi wartościami i dostarcza informacji o istniejących odchyleniach w czasie rzeczywistym (rys. 9). Informacje te są przekazywane do panelu operatorskiego oraz do centrum diagnostycznego, gdzie ocenia się jakość zgrzewanych styków w odniesieniu do wyników testów nieniszczących i niszczących. Instytut EMAG posiada wieloletnie doświadczenie w zakresie maszyn i urządzeń monitorujących, natomiast KZESO MACHINERY zajmuje się produkcją i wdrażaniem kompleksowych rozwiązań.

Monitorowanie wewnątrzprocesowe pozwala na bardzo dokładne określenie możliwych naruszeń wcześniej ustawionych trybów dostarczania energii i ocenia poziom ich wpływu na jakość zgrzewanych styków. Dodatkowo system monitorowania wewnątrzprocesowego wykrywa odchylenia parametrów iskrowych, które mają wpływ na tworzenie styków w końcowej fazie zgrzewania iskrowego i oporowego.

W rzeczywistych warunkach obsługi sprzętu do zgrzewania szyn, zwłaszcza w warunkach polowych, możliwe są odchylenia od wcześniej ustawionych parametrów. Aby zminimalizować ich negatywny wpływ na jakość spawów, opracowano adaptacyjny system automatycznego sterowania wcześniej ustawionymi parametrami zgrzewania. Na podstawie danych zgromadzonych podczas wewnątrzprocesowego monitorowania, określono algorytmy informacji zwrotnych w systemach sterowania głównymi parametrami procesu iskrzenia, które zapewniają stabilne odtworzenie wcześniej ustalonych programów zgrzewania poprzez ich skorygowanie. Przykładowo, podczas nieprzewidzianej zmiany w napięciu sieci i przy wzroście oporu obwodu zgrzewającego maszyny na skutek przegrzania, proces iskrzenia może zostać zatrzymany, jeżeli program zmian napięcia jest bardzo ściśle określony. W takim przypadku system sterowania adaptacyjnego skoryguje program, przy którym kontynuowane jest iskrzenie, a zużycie energii zostanie na wcześniej ustalonym poziomie.

**Архив (Текущая база)**

**Мастер** Минтян В.Н.  
**Сварщик** Царинный С.А.  
**Дефектоскопист** Коваль и  
**Номер смены** 539

30.05.2016  
 15:18:09

**Р65 - пульсирующее оплавление**

**База**

Имя	Дата	Время	V	S	T	U1	U2	I	Vф	КЭФ	P	L	LI	Vo	Zкз	Ско	Рез
36021n-16	3.05.201	22:12:24	0,141	27,7	91	376	310	446	1,5	Нет	104	13,9	1,7	50	111,5	Нет	Вр
36021n-17	3.05.201	22:21:16	0,138	27,5	87	378	311	435	1,3	Нет	105	13,8	1,7	51	111,7	Нет	Вр
36021n-18	3.05.201	22:28:40	0,135	27,6	89	378	311	445	1,3	Нет	104	14	1,8	39	108,2	Нет	Вр
36021n-19	3.05.201	22:40:17	0,169	27,6	83	377	311	436	1	Нет	106	13,9	1,8	54	110,6	Нет	Вр
36021n-20	3.05.201	22:47:43	0,152	27,6	88	374	311	452	1,3	Нет	104	13,9	1,9	54	110,6	Нет	Вр
36021n-21	3.05.201	23:06:08	0,127	27,6	85	383	311	445	1	Нет	104	13,7	1,7	43	101,2	Нет	Вр
35961n-1	3.05.201	23:16:14	0,115	27,6	85	380	311	452	1,1	Нет	105	13,9	1,7	48	111,3	Нет	Вр
35961n-2	3.05.201	23:22:09	0,135	27,7	87	377	311	472	1,4	Нет	104	13,9	1,7	54	109,8	Нет	Вр
35961n-3	3.05.201	23:33:47	0,135	27,7	88	377	312	430	1,3	Нет	105	13,9	1,9	42	99,8	Нет	Вр

Rys. 9. Raport na temat styków spawanych z parametrami zgrzewania

## 2. ZGRZEWANIE SZYN NA TORACH Z NAPRĘŻENIEM

W konstruowaniu i naprawie torów zgrzewanych w sposób ciągły konieczne jest ustabilizowanie stanów naprężenia poszczególnych odcinków szyn. W zgrzewanych w ten sposób szynach, umocowanych sztywno na podkładach, dochodzi do naprężeń spowodowanych zmianami w temperaturze otoczenia. Na obszarach położonych w środkowych szerokościach geograficznych rozrzut temperatur wynosi  $90^{\circ}\text{C}$  ( $-45 + 50^{\circ}\text{C}$ ). Aby zmniejszyć naprężenia, należy okresowo zmniejszać napięcie poprzez wymianę wkładów szynowych o odpowiednich długościach dwa razy w roku (wiosną i jesienią) [3]. Podobny problem występuje podczas zmniejszania naprężeń, kiedy konieczna jest naprawa toru. Wtedy zamiast wycinania wadliwej części, wkłada się nową szynę, która jest zgrzewana na odpowiednią sekcję w dwóch miejscach (rys. 10). W zgrzewaniu doczołowym iskrowym szyny są skracane, tak aby uzyskać odpowiednią przestrzeń na przyspawanie czoła zamykającego: szyna jest zginana, aby powstała ta przestrzeń. Jednocześnie napęd maszyny zgrzewającej powinien zapewnić wysoką dokładność przy skracaniu szyny w końcowej fazie zgrzewania. Taka technologia naprawy torów zgrzewanych w sposób ciągły, za pomocą zgrzewania doczołowego iskrowego, używana jest na liniach kolejowych Ukrainy i innych krajów, zgodnie z normami [2].

W procesie realizacji takich prac zaproponowano przeprowadzenie tej operacji bez zginania wstawionego odcinka szyny oraz uzyskanie odpowiedniej przestrzeni do zgrzewania z powodu naprężeń zgrzewanych sekcji szyny. Zastosowanie zgrzewania iskrowego pulsacyjnego pozwala zachować 2 razy większą przestrzeń dla iskrzenia niż w przypadku zgrzewania iskrowego ciągłego. Ułatwia to znacznie rozwiązanie problemu.

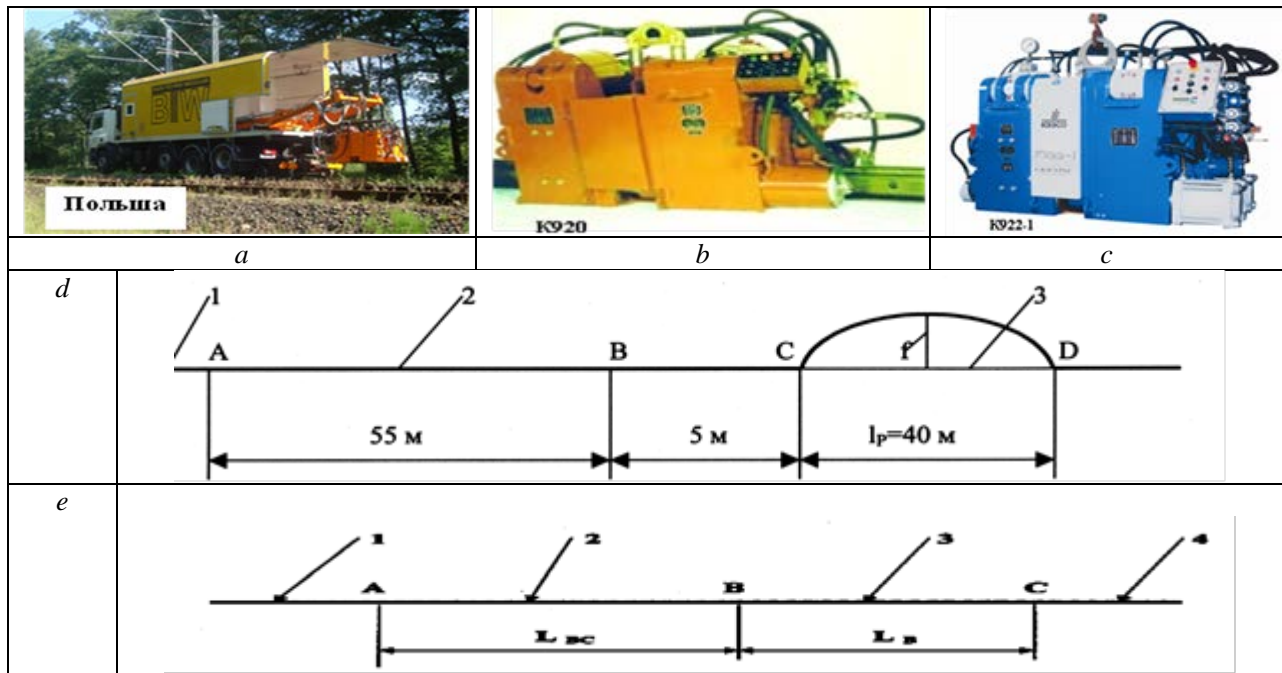
Na bazie zgrzewania pulsacyjnego iskrowego, w Instytucie Zgrzewania Elektrycznego E.O. Paton opracowano kompleksowy system do automatycznej wieloczynnikowej kontroli parametrów zgrzewania, połączony z programem, ustawiający wcześniej siłę naprężenia sekcji szyny. System ten zapewnia stałe działanie wcześniej ustawionych trybów zgrzewania bez względu na siłę naprężenia sekcji szyn. Operator wprowadza tylko do komputera dane na temat temperatury, w której odbywa się zgrzewanie.

Udane zastosowanie technologii zgrzewania szyn z naprężeniem podczas naprawy torów zgrzewanych w sposób ciągły umożliwiło zaoferowanie bardziej radykalnego rozwiązania w celu stabilizacji stanu naprężenia torów. Rozwiązanie to oparte jest na stworzeniu stałej wytrzymałości na rozciąganie w zgrzewanych sekcjach szyn o takiej wartości, aby nie występowały w nich naprężenia ściskające podczas zmian temperatur w zakresie  $90^{\circ}\text{C}$ . Obliczenia pokazują, że wytrzymałość na rozciąganie została zachowana a jej maksymalna wartość przekroczyła  $14 \text{ kg/mm}^2$  i taki poziom naprężeń jest akceptowalny



dla szyn o wysokiej wytrzymałości. Technologia zgrzewania napięciowego została zastosowana przez firmę amerykańską Norfolk, która używa sprzętu zaprojektowanego przez PWI. W ten sposób dokona-

no zgrzewania sposobem ciągłym setek kilometrów szyn.



Rys. 10. Schemat zgrzewania szyn na torze:

a – mobilna maszyna do zgrzewania szyn K922-1; b – maszyna do zgrzewania szyn K920; c – maszyna do zgrzewania szyn K922-1; d – schemat zaginania sekcji szyny przed zgrzewaniem z odtworzeniem za pomocą metody częściowego demontażu; e – schemat demontażu sekcji szyny przed zgrzewaniem z odtworzeniem za pomocą metody naprężeniowej

Tabela 4

Charakterystyka maszyn zgrzewających

Parametry zgrzewania	Rodzaje maszyn							
	K355A-1	K900A-1	K920-1	K921	K922-1	K922-2	K930	K950
Prąd znamionowy pierwotny (cykl pracy=50%), A	395	395	540	540	540	540	540	540
Moc znamionowa (cykl pracy=50%), kVA	150	170	210	210	210	210	210	210
Współczynnik transformacji	60	60	54	54	54	54	54	54
Znamionowa siła oporowa, kN (kgf)	450 (45000)	500 (50000)	1000 (100000)	1500 (150000)	1200 (120000)	1200 (120000)	1200 (120000)	1200 (120000)
Znamionowa siła zacisku, kN (kgf)	1250 (125000)	1200 (120000)	2500 (250000)	3750 (375000)	2900 (290000)	2900 (290000)	2900 (290000)	2900 (290000)
Prędkość oporowa w trybie jałowym, mm/s, nie mniej niż	20	25	35	35	40	50	50	50
Przesuw maszyny, mm	70	70	90	150	100	150	200	250
Masa głowicy zgrzewającej, kg, nie więcej niż	2375	2500	2900	4200	3450	3500	3500	3500
Masa of zestawu do dostawy, kg, nie więcej niż	4000	4100	4500	6000	5100	5150	5200	5250
Wymiary (B × H × L), mm	810 × 1059 × 1140	1030 × 1140 × 1550	1060 × 1195 × 1600	1190 × 1400 × 2430	1060 × 1300 × 1895	1060 × 1300 × 2050	1060 × 1300 × 2095	1060 × 1300 × 2145

### 3. SPRZĘT DO ZGRZEWANIA SZYN O WYSOKIEJ WYTRZYMAŁOŚCI

W ostatnich kilku dekadach opracowano w PWI nową generację mobilnych maszyn do zgrzewania szyn. Maszyny zostały wyprodukowane przez Zakład Produkcji Elektrycznego Sprzętu Zgrzewającego Kachowka według dokumentacji PWI. Końcowy montaż, implementacja oraz usługi gwarancyjne i pogwarancyjne tych maszyn są w Polsce zapewniające przez KZESO MACHINERY Ltd. W tabeli 4 zawarto ich charakterystykę techniczną. Wszystkie maszyny wyposażone są w nowoczesne systemy komputerowe do wieloczynnikowej kontroli głównych parametrów oraz napędy hydrauliczne o szybkim działaniu, które pozwalają na użycie tych maszyn do zgrzewania szyn o wysokiej wytrzymałości przy różnych poziomach poboru energii i z naprężeniem. Maszyny posiadają również wbudowane urządzenia do usuwania iskrzenia w stanach gorących bez potrzeby rozpinania sekcji szyny. Jest to konieczne przy zgrzewaniu z naprężeniem. Masę maszyny zwiększono o 10-20% w stosunku do maszyn poprzedniej generacji używanych do zgrzewania. Dlatego mogą one być zastosowane na dostępnych przedsiębiorstwach do zgrzewania szyn.

### 4. PODSUMOWANIE

Technologia zgrzewania doczołowego iskrowego szyn o wysokiej wytrzymałości R260 i R350HT została opracowana w celu zapewnienia własności styków spawanych zgodnie ze standardami Unii Europejskiej i kolei w Polsce. Technologia ta jest oparta na metodzie zgrzewania iskrowego pulsacyjnego, opracowanej przez Instytut Zgrzewania Elektrycznego E.O. Paton.

Wykazano, że podczas zgrzewania szyn o wysokiej wytrzymałości, aby uzyskać wymagane własności mechaniczne styków spawanych, konieczne jest zmniejszenie dostarczanej energii w porównaniu z istniejącymi technologiami dla styków szyn niepoddanych ogrzewaniu.

W zgrzewaniu o zmniejszonej dostarczanej energii wymagania co do dopuszczalnych odchyłeń od wcześniej ustawionych optymalnych warunków zgrzewania są bardziej rygorystyczne.

W maszynach K922 nowej generacji do zgrzewania szyn zainstalowane są systemy automatycznej wieloczynnikowej kontroli iskrzenia, które zapewniają

dokładne odtworzenie wcześniej ustawionych technologii zgrzewania szyn o wysokiej wytrzymałości podczas naprawy i konstruowania torów kolejowych.

Zastosowanie maszyny K922 pozwala na użycie nowej technologii do stabilizacji stanów naprężenia temperaturowego na torach zgrzewanych w sposób ciągły, przy pomocy zgrzewania z naprężeniem.

Współpraca między instytutami PWI i EMAG pozwala na opracowanie nowych rozwiązań w zakresie automatyzacji, sterowania i wizualizacji działań i procesów maszyn. Rozwiązania te będą wdrażane w Polsce przez KZESO MACHINERY Ltd.

#### Literatura

1. Czyczula W.: Stan nauki w dziedzinie dróg kolejowych – diagnoza i rozwój. W: Materiały XII Konferencji Naukowej Drogi Kolejowe 2003. Gdańsk-Sobieszewo, s. 95-100, 2003
2. Czyczula W.: Tory kolejowe – modele matematyczne. Koleje – rozjazdy – modele matematyczne. Szyny bezstykowe spawane. Politechnika Poznańska
3. Danilenko E.I.: Technical recommendations on organizing, laying out, repair and maintenance of continuous welded track at the railroads of Ukraine. Ukrainian Transport, 2002
4. European standard EN 14587-1-2007 – EN 14587-1-2007 – CEN – European Committee on Standardization.
5. Kuchuk-Yatsenko S.I.: *Defects of joints of high-strength rails produced using flash-butt welding*. Avtomaticheskaya Svarka, 9, pp. 3-9, 2013
6. Kuchuk-Yatsenko S.I.: *Technology and equipment for flash-butt welding of high-strength rails*, Avtomaticheskaya Svarka, 11, pp. 129-138, 2008.
7. Kuchuk-Yatsenko S.I.: *Technology and new generation of equipment for flash-butt welding of high-strength rails of modern production in the construction and reconstruction of high-speed railway lines*. Avtomaticheskaya Svarka, 6, pp. 32-38, 201.
8. Patent UA 46820, 6 V 23K 11/04, S2 Ukraine. Method of flash-butt welding, Published 17.06.2002.
9. Tokareva A.E.: *Restoration of defective rail sections*, Put' and Putevoye khozyajstvo, 4, 2002.
10. Wojtas P., Kozłowski A.: *Innowacyjne rozwiązania CNP EMAG*. Sympozjum SEMAG: Elektroenergetyka i automatyka w przemyśle wydobywczym, Szklarska Poręba, 2013.

S.I. KUCHUK-YATSENKO,  
A.V. DIDKOVSKY, V.I. SHVETS, E.V. ANTIPIN  
The E.O.Paton Electric Welding Institute of the NAS  
of Ukraine,  
11, Kazimir Malevich St, Kiev, 03680, Ukraine  
e-mail: office@paton.kiev.ua

PIOTR WOJTAS  
KZESO MACHINERY Ltd. of Poland,  
ul. Karoliny 4, 40-186 Katowice  
e-mail: piotr.wojtas@kzesop.pl

ARTUR KOZŁOWSKI  
Instytut Technik Innowacyjnych EMAG  
ul. Leopolda 31, 40-189 Katowice  
e-mail: artur.kozlowski@ibemag.pl