



AKADEMIA TECHNICZNO-ROLNICZA  
IM. JANA I JĘDRZEJA ŚNIADECKICH  
W BYDGOSZCZY

ZESZYTY NAUKOWE NR 237

# MECHANIKA 51

WYDZIAŁ  
MECHANICZNY



BYDGOSZCZ – 2002



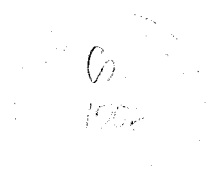




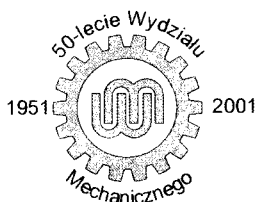
AKADEMIA TECHNICZNO-ROLNICZA  
IM. JANA I JĘDRZEJA ŚNIADECKICH  
W BYDGOSZCZY

ZESZYTY NAUKOWE NR 237

# MECHANIKA 51



**Seminarium**  
**Techniki spajania stosowane w kolejnictwie**



BYDGOSZCZ – 2002

REDAKTOR NACZELNY  
dr hab. inż. Janusz Prusiński, prof. nadzw. ATR

REDAKTOR DZIAŁOWY  
prof. dr hab. inż. Maciej Woropay

OPRACOWANIE TECHNICZNE  
inż. Edward Gołata, mgr inż. Daniel Morzyński

© Copyright  
Wydawnictwa Uczelniane Akademii Techniczno-Rolniczej  
Bydgoszcz 2002

ISSN 0208-6395

Wydawnictwa Uczelniane Akademii Techniczno-Rolniczej  
ul. Ks. A. Kordeckiego 20, 85-225 Bydgoszcz, tel. (052) 3749482, 3749426  
e-mail: [wydawucz@atr.bydgoszcz.pl](mailto:wydawucz@atr.bydgoszcz.pl) <http://www.atr.bydgoszcz.pl/~wyd>

---

Wyd. I. Nakład 120 egz. Ark. aut. 4,6. Ark. druk. 5,0. Papier druk. kl. III.  
Oddano do druku i druk ukończono w styczniu 2002 r. Zamówienie nr 2/2002  
Uczelniany Zakład Małej Poligrafii ATR Bydgoszcz, ul. Ks. A. Kordeckiego 20

*Ms. 1000-1000*  
*2002*

## SPIS TREŚCI

1. Piotr Adamiec, Jerzy Dziubiński – Trwałość szyn kolejowych .....	5
2. Włodzimierz Walczak – Zgrzewanie wybuchowe metali i jego niektóre zastosowania .....	15
3. Andrzej Zając – Podejście procesowe do zarządzania jakością wytwarzania wyrobów i konstrukcji spawanych .....	23
4. Andrzej Zając – Zgrzewanie elektryczne szyn kolejowych – ograniczenia i możliwości techniczne .....	35
5. Eugeniusz Ranatowski – Uwagi o aplikacji technik spawalniczych w kolejnictwie w aspekcie analizy wymiarowej procesu – podstawy teoretyczne .....	53
6. Eugeniusz Ranatowski – Uwagi o aplikacji technik spawalniczych w kolejnictwie w aspekcie analizy wymiarowej procesu – przykłady zastosowań .....	63
7. Stanisław Dymski, Eugeniusz Ranatowski, Jan Szafrąński – Przypadek pęknięcia dziobnic rozjazdu kolejowego .....	71



# CERTYFIKAT CERTIFICATE

Przyznany organizacji:  
issued for:

**Akademia Techniczno-Rolnicza  
im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich  
KATEDRA INŻYNIERII MATERIAŁOWEJ  
Wydział Mechaniczny  
ul. Prof. S. Kaliskiego 7  
85-796 Bydgoszcz**

Biuro Certyfikacji Polskiego Rejestru Statków S.A. zaświadcza, że System Zarządzania Jakością wyżej wymienionej organizacji został oceniony i stwierdzono zgodność z wymaganiami:

Certification Bureau of Polski Rejestr Statków S.A. certifies that the Quality Management System of the above organization has been assessed and found to be in accordance with the requirements of:

**ISO 9002:1994**

Zakres certyfikacji:

**BADANIA STRUKTURY I WŁAŚCWOŚCI MATERIAŁÓW METALOWYCH  
I NIEMETALOWYCH  
BADANIA PROCESÓW SPAJANIA METALI I STOPÓW  
INŻYNIERIA OBRÓBKI CIEPLNEJ, PŁASTYCZNEJ ORAZ ODLEWNICTWA**

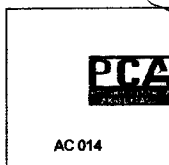
Scope of certification:

**TESTING THE MICROSTRUCTURE AND PROPERTIES OF METAL AND NOT METAL  
MATERIALS  
TESTING WELDING OF METALS ALLOYS  
THERMAL AND PLASTIC TREATMENT ENGINEERING AND FOUNDED ENGINEERING**

Certyfikat jest ważny do:  
The Certificate is valid until:

15.12.2003

Nr Certyfikatu: **NC-293**  
Certificate No.:



*Jan Jankowski*

Jan Jankowski

*Bogdan Przybyłski*

Bogdan Przybyłski

Gdańsk, 10.07.2001

## TRWAŁOŚĆ SZYN KOLEJOWYCH

Piotr Adamiec, Jerzy Dziubiński

Politechnika Śląska w Gliwicach, Instytut Transportu  
ul. Krasińskiego 8, 40-019 Katowice

Zaproponowano metodykę oceny trwałości szyn. Badano zużycie eksploatacyjne szyn twardych (332 HB) po obróbce cieplnej oraz szyn zwykłych (266 HB), bez obróbki cieplnej. Analizowano zużycie ściernoadhezyjne szyn oraz ich zużycie w efekcie zmęczenia kontaktowego. Wyznaczono charakterystyki trwałościowe badanych szyn wykorzystując pomiary zużycia szyn w torze na terenie Śląskiej DOKP. Stwierdzono korzystny wpływ dużej twardości szyn na ich trwałość przy kryterium odporności na ścieranie, natomiast nie stwierdzono wpływu twardości szyn na ich odporność na zmęczenie kontaktowe.

### I. WPROWADZENIE

Pojazd szynowy poruszający się po torach można uważać za obiekt techniczny, który cechuje się określoną gotowością eksploatacyjną, wynikającą z trwałości i niezawodności elementów składających się na ten obiekt. Gotowość eksploatacyjna jest jednym z czynników decydujących o jakości użytkowej obiektu rozumianej jako stopień spełnienia wymagań użytkownika. Taki obiekt techniczny jest systemem składającym się z szeregu elementów w strukturach niezawodnościowo: szeregowych i równoległych.

Zakładając w uproszczeniu, że szyny stanowią słabe ogniwo w takim obiekcie, to gotowość eksploatacyjna jest funkcją ich własności użytkowych, a w szczególności ich trwałości i niezawodności. Cechy te zależą od zużycia szyn, tzn. z jednej strony zależą od zużycia ściernoadhezyjnego, a z drugiej – od zużycia zmęczeniowego stykowego. Trwałość szyn rozumiana jest zwykle jako czas do osiągnięcia stanu ich niezdatności; za stan taki można np. uważać ubytek liniowy główki szyny w przedziale 12-16 mm, który stanowi wielkości dopuszczalne zużycia szyn pracujących w różnych warunkach eksploatacji.

Bardziej złożona jest interpretacja stanu niezdatności w przypadku zużycia zmęczeniowego, które może mieć formę pęknięć podpowierzchniowych, powodujących łuszczenia się szyn (spelling) lub pęknięć prostopadłych do powierzchni prowadzących do pęknięcia szyn na wskroś.

Ogólnie zużycie jest funkcją właściwości mechanicznych elementów koło – szyna oraz stanu naprężeń w obszarze kontaktu, jak również funkcją czasu.

W pracy analizowano stan naprężeń kontaktowych stosując model numeryczny układu koło – szyna, a wyniki wykorzystano do oceny trwałości szyn nieobrabianych oraz obrabianych cieplnie różniących się strukturą i twardością. Wyniki analizy nume-

rycznej układu koło – szyna zostały porównane z eksploatacyjnymi wynikami zużycia ścierno-adhezyjnego i zmęczeniowo-stykowego szyn na obszarze Śląskiej DOKP.

## 2. STAN NAPRĘŻEŃ KONTAKTOWYCH W UKŁADZIE KOŁO – SZYNA

Do oceny stanu naprężeń kontaktowych wykorzystano model numeryczny (rys. 1), a w szczególności metodę elementów skończonych (MES), która pozwoliła na określenie naprężeń  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  i  $\tau_{xy}$ , przy założeniach:

- układ koło – szyna stanowi układ sprężystego, jednorodnego i izotropowego walca współpracującego z podobnym elementem o płaskiej powierzchni ( $R_2 \rightarrow \infty$ ),
- obszar styku jest prostokątem o szerokości  $2 \cdot b$ , przy czym

$$b = \sqrt{4P' \cdot R / (\pi E^*)}$$

$$E^* = \left[ (1 - \nu_1^2) E_1 + (1 - \nu_2^2) / E_2 \right]^{-1}$$

$$R = 1 / R_1 + 1 / R_2$$

gdzie:

- $P'$  – siła docisku na jednostkę długości styku,
- $E_1, E_2$  – moduły Younga,
- $\nu_1, \nu_2$  – współczynniki Poissona,

- maksymalne naprężenie na powierzchni styku wynosi:

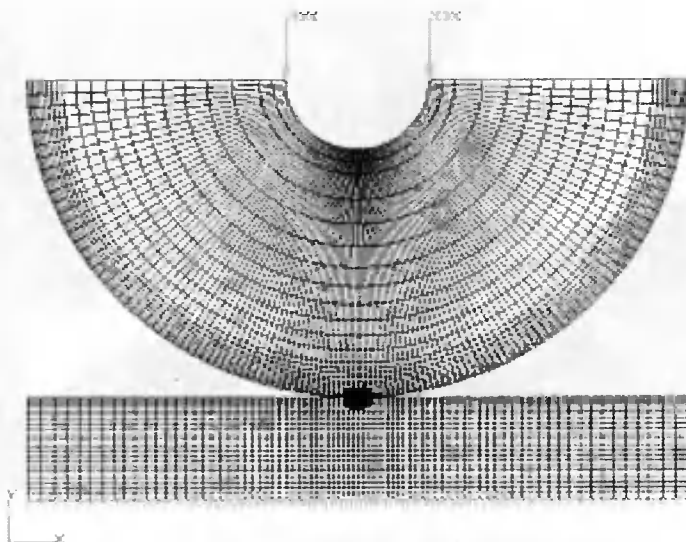
$$p = 2P' / \pi b$$

- punkt maksymalnych naprężeń redukowanych (punkt Bielajewa) jest określony współrzędną  $Z_B$ ,
- przyjęto:  $E_1 = E_2 = 2,05 \cdot 10^5$  MPa,  $\nu_1 = \nu_2 = 0,3$ ,  $R_1 = 460$  mm,  $R_2 = \infty$ .

Wykonane obliczenia [1] wskazują, że wzrost obciążenia na koło z 40 kN do 100 kN powoduje wzrost maksymalnych naprężeń stykowych w szynie  $\sigma_x$  od  $|107|$  MPa do  $|295|$  MPa,  $\sigma_y$  od  $|193|$  MPa do  $|361|$  MPa, a  $\tau_{xy}$  od 34 MPa do 68 MPa. W takim przypadku stosunek  $\sigma_{red} / p_{max}$  maleje od wartości 0,86 do 0,64 wg hipotezy Hubera-Misesa, a od 0,95 do 0,688 wg hipotezy Treski. Naprężenie maksymalne redukowane zgodnie z hipotezą Hubera-Misesa lub Treski nie jest funkcją monotoniczną rosnącą wraz ze wzrostem obciążenia, a minimalne wartości  $\sigma_{red}$  równe ok. 200 MPa uzyskuje się dla obciążeń 40 i 60 kN. Położenie punktu maksymalnych naprężeń redukowanych  $Z_B$  dla badanych obciążeń wynosi od 0,8 do 1,6 mm.

Przykład rozkładu naprężeń redukowanych przedstawiono na rysunku 2. Interesującym jest również rozkład naprężeń stycznych  $\tau_{xy}$  przedstawiony na rysunku 3, który wskazuje na możliwość pojawienia się pod powierzchnią kontaktu naprężeń zmiennych dodatnich za punktem styku i ujemnych przed takim punktem, które mogą powodować zużycie zmęczeniowe stykowe.

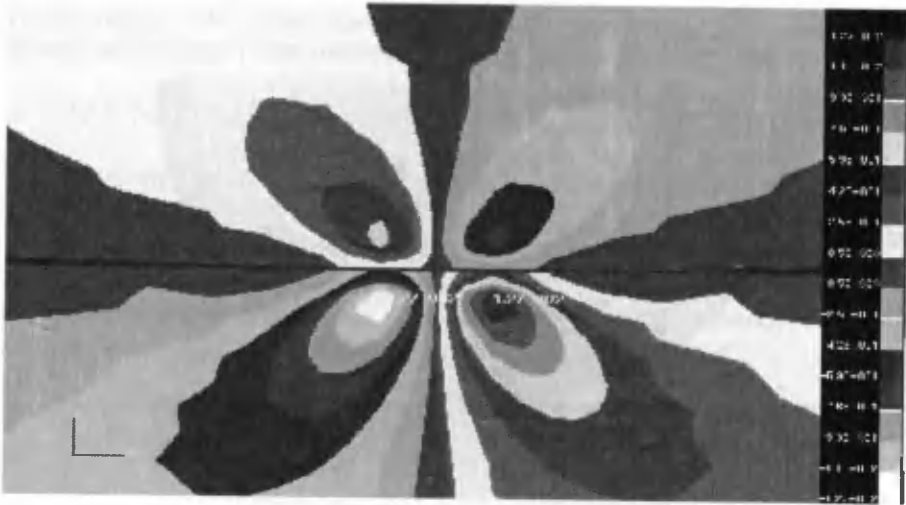




Rys. 1. Schemat modelu numerycznego MES układu koło – szyna

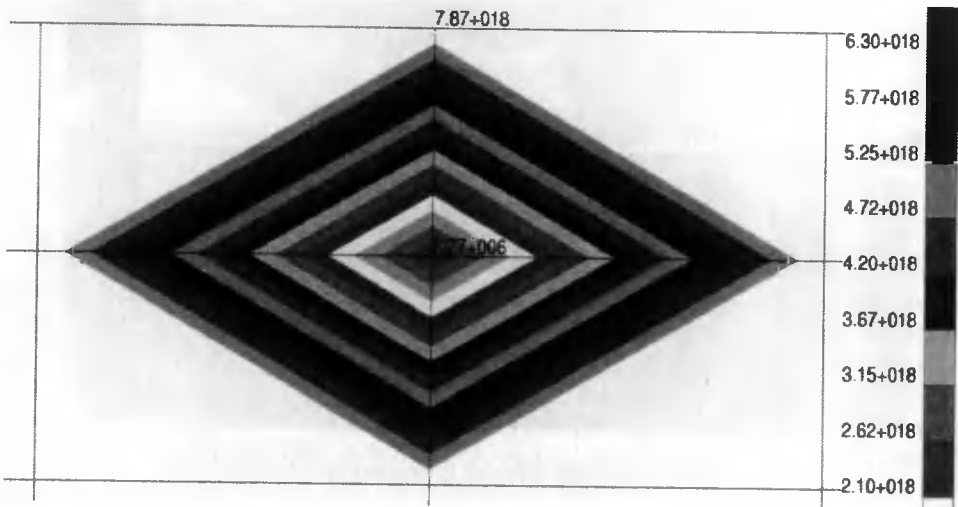


Rys. 2. Przykład rozkładu naprężeń zredukowanych dla  $P = 40$  kN



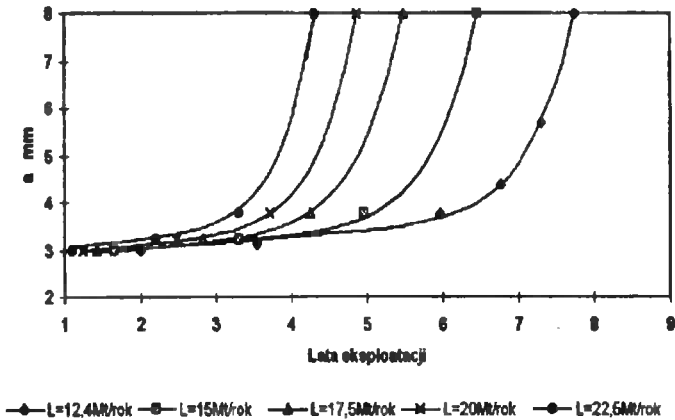
Rys. 3. Przykład naprężeń stycznych  $\tau_{xy}$  dla  $P = 40$  kN

Pojawiające się zmienne naprężenia w obszarze maksymalnych naprężeń redukowanych (punkt Bielajewa) powodują zmiany w warstwie wierzchniej szyny, które mogą prowadzić do inicjowania pęknięć zmęczeniowych. Na rysunku 4 przedstawiono rozkład cykli zmęczeniowych niezbędnych do inicjowania szczeliny zmęczeniowej w obszarze punktu Bielajewa dla przypadku szyny obrabianej cieplnie obciążonej siłą 100 kN.



Rys. 4. Rozkład liczby cykli niezbędnych dla inicjowania pęknięć zmęczeniowych w obszarze punktu Bielajewa dla  $P = 100$  kN

Obliczenia numeryczne rozwoju tak inicjowanej szczeliny (program PATRAN-/FATIGUE) dla różnych obciążeń eksploatacyjnych przedstawiono na rysunku 5.

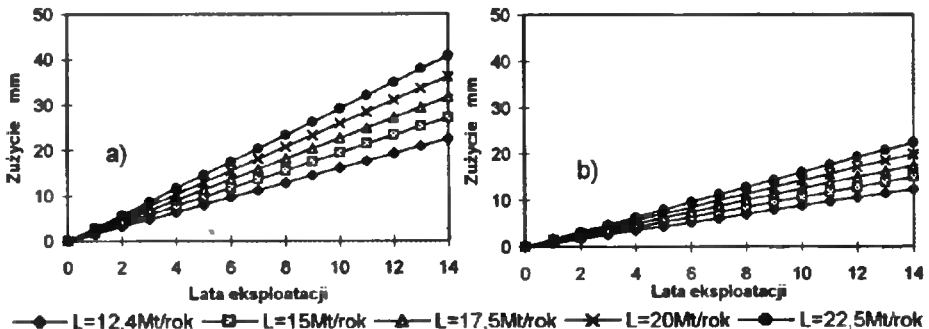


Rys. 5. Rozwój szczeliny zmęczeniowej w zależności od lat eksploatacji szyny przy obciążeniu  $P = 40 \text{ kN}$

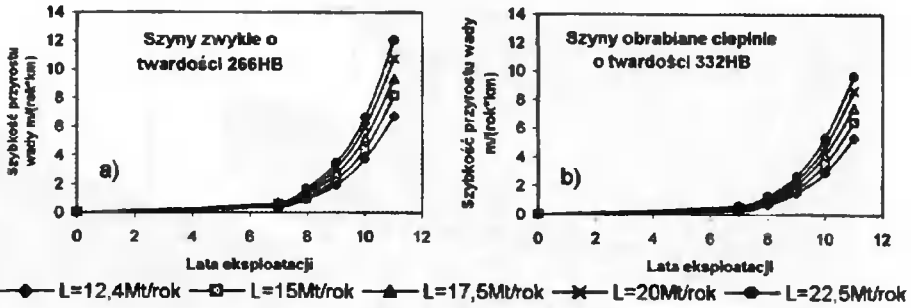
Obliczenia wskazują na pewną stabilizację początkowej wielkości szczeliny. Jej propagacja do wartości dopuszczalnych określa trwałość szyny.

### 3. OCENA TRWAŁOŚCI EKSPLOATACYJNEJ SZYN

Do oceny trwałości szyn wykorzystano szyny nie obrabiane i obrabiane cieplnie, eksploatowane w torze na odcinku Śląskiej DOKP [2]. Badano zużycie szyn w gatunku S49 o średniej twardości 266 HB oraz szyn obrabianych w gatunku UIC60 o podwyższonej twardości 332 HB. Zużycie ubytkowe takich szyn, w zależności od obciążenia i czasu przedstawiono w pracy [3] (rys. 6). W pracy tej dokonano również analizy intensywności przyrostu szczelin podpowierzchniowych badanych szyn (rys. 7).

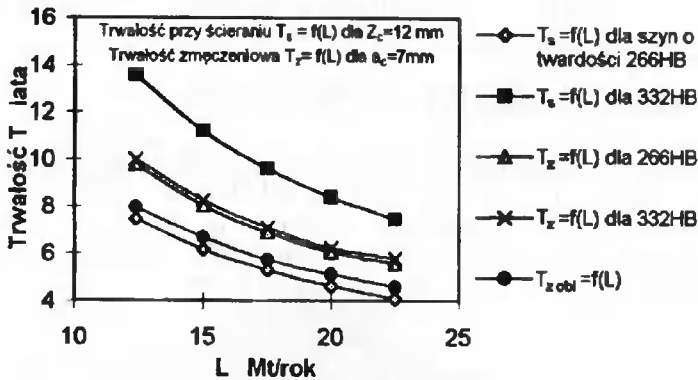


Rys. 6. Zużycie ścierno-adhezyjne szyn zwykłych S49 (a) i obrabianych cieplnie UIC (b)



Rys. 7. Przyrost pęknięć podpowierzchniowych w szynach zwykłych (a) i obrabianych cieplnie (b) w zależności od warunków obciążenia

Analiza warunków zużycia ścierno-adhezyjnego (ubytkowego) i zużycia zmęczeniowo-stykowego, przy założeniu krytycznej wartości zużycia geometrycznego  $Z_c = 12$  mm oraz krytycznego pęknięcia  $a_c = 7$  mm określa trwałość szyny do wymiany w zależności od ich obciążenia (rys. 8).



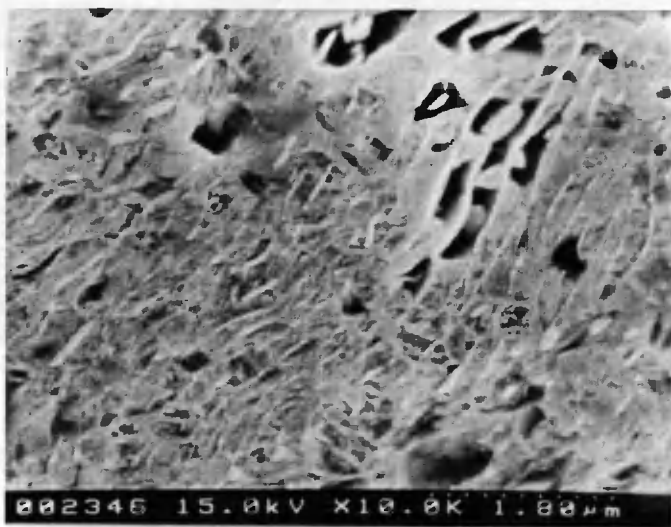
Rys. 8. Trwałość szyn zwykłych i obrabianych cieplnie określona przy kryterium zużycia ścierno-adhezyjnego ( $Z_c = 12$  mm) i zużycia zmęczeniowo-stykowego ( $a_c = 7$  mm)

Analiza wyników przedstawionych na rysunkach 6÷8 wskazuje na możliwość zużywania się szyn w efekcie ubytku geometrycznego główki szyny oraz powstawania pęknięć zmęczeniowych i ich narastania, zwykle w formie pęknięć podpowierzchniowych. Ocena przebiegu trwałości szyn w różnych warunkach eksploatacji wskazuje, że w przypadku szyn zwykłych (266 HB) zużyciem krytycznym jest zużycie ściernie, którego duża intensywność eliminuje możliwość rozwoju pęknięć podpowierzchniowych. Natomiast w przypadku szyn obrabianych cieplnie (332 HB) dominującym zużyciem jest narastanie pęknięć podpowierzchniowych, które decyduje o trwałości szyn. Dla wyjaśnienia tych zależności przeprowadzono badania metalograficzne szyn.

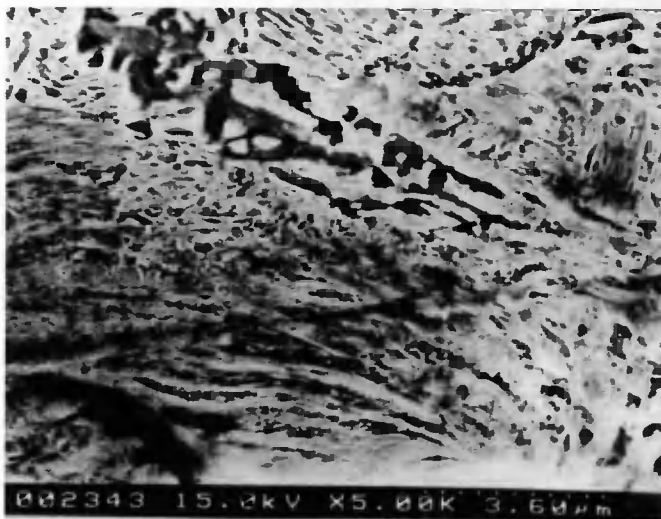
#### 4. BADANIA METALOGRAFICZNE

Badania metalograficzne przeprowadzono w celu uzyskania informacji dotyczących mechanizmów zużycia eksploatacyjnego szyn nie obrabianych i obrabianych cieplnie.

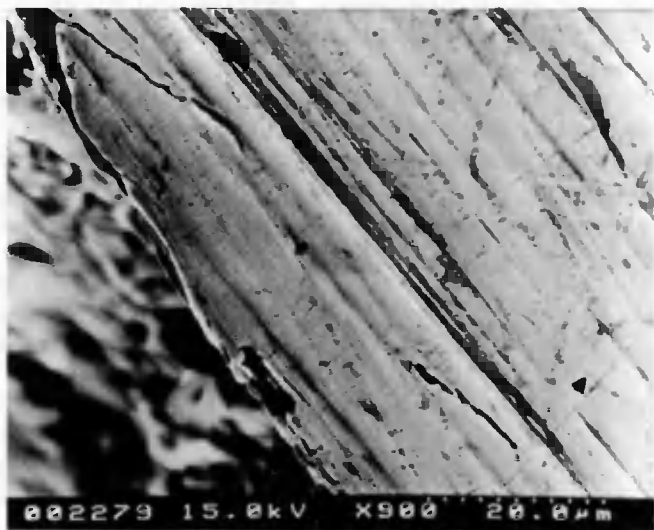
Stwierdzono w obu przypadkach występowanie strefy odkształconej plastycznie, w której występują mikropęknięcia związane ze zmiennym obciążeniem (rys. 9, 10). Pęknięcia usytuowane zwykle są pod kątem ( $\alpha \sim 30^\circ$ ) do powierzchni tocznej szyny (rys. 11, 12), przy czym w przypadku szyn nie obrabianych pęknięcia w formie powstających wyrw (rys. 13) decydują o zużyciu ścierno-adhezyjnym szyny. Natomiast w przypadku szyn obrabianych cieplnie obserwuje się wzrost takich mikropęknięć do makropęknięć podpowierzchniowych (rys. 14).



Rys. 9. Szyna S49. Odkształcone płytki perlitu i mikropęknięcia zmęczeniowe. Traw. nital, pow. 10000x



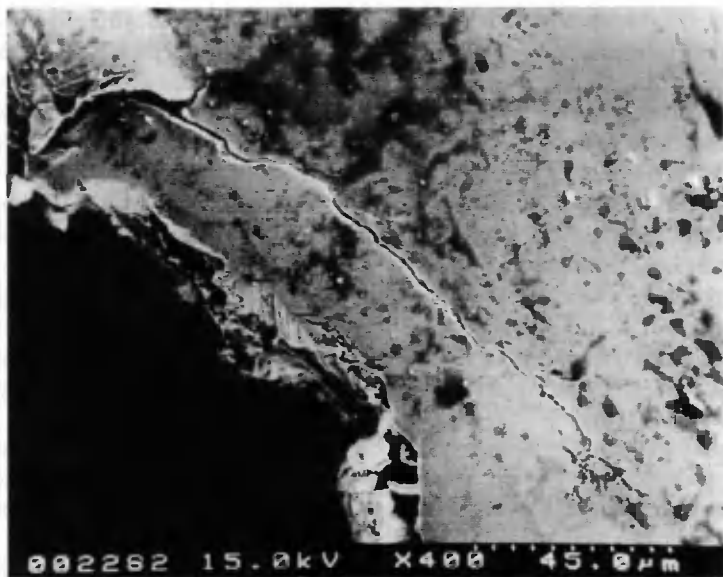
Rys. 10. Szyna UIC60. Struktura martenzytyczna w odkształconej ww. Widoczne mikropęknięcia zmęczeniowe. Traw. nital, pow. 5000x



Rys. 11. Szyna S49. Typowe mikropęknięcia zmęczeniowe w ww. Pow. 50x



Rys. 12. Szyna UIC. Typowe mikropęknięcia zmęczeniowe w ww. Pow. 500x



Rys. 13. Szyna S49. Mikrowyrywy decydujące o zużyciu ścierno-adhezyjnym. Pow. 300x



Rys. 14. Szyna UIC60. Pęknięcia podpowierzchniowe w ww. Pow. 16x

Obserwacje zużycia eksploatacyjnego szyn wskazują, że dla szyn o większych twardościach, np. po obróbce cieplnej celowe jest stosowanie dużych obciążeń, które powodując intensywne zużycie warstwy wierzchniej (ww) zapobiegają wzrostowi szczelin podpowierzchniowych do wielkości krytycznych i zapobiegają w efekcie powstawania makropęknięć podpowierzchniowych.

## 5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Obliczenia numeryczne układu koło – szyna wskazują na obecność dużych naprężeń kontaktowych zarówno w obszarze styku, jak i w warstwie wierzchniej w obszarze punktu Bielajewa. W obszarze tym obserwuje się występowanie zmiennych naprężeń stycznych. Taki rezultat obciążenia układu koło – szyna prowadzi do intensywnego zużycia ścierno-adhezyjnego i zmęczeniowo-stykowego. Intensywność zużywania się zależy od właściwości materiału elementów układu. Badania szyn po eksploatacji w torze potwierdzają ww. uwagi, tzn. w przypadku szyn zwykłych S49 (226 HB) dominującym

zużyciem jest zużycie ścierno-adhezyjne i jego intensywność decyduje o trwałości takich szyn (rys. 8). Natomiast w przypadku szyn obrabianych cieplnie o trwałości takich szyn decyduje intensywność narastania pęknięć podpowierzchniowych (rys. 8).

Badania metalograficzne wskazują, że w czasie eksploatacji w odkształconej warstwie wierzchniej szyn zlokalizowane są zawsze mikropęknięcia zmęczeniowe, które mogą przy szynach o niższej twardości brać udział – w formie mikrowyrw – w procesie zużycia ścierno-adhezyjnego, a przy szynach o wysokich twardościach, np. obrabianych cieplnie, mikropęknięcia mają możliwość uzyskania wielkości krytycznej i propagują w formie pęknięć podpowierzchniowych.

Modelowanie numeryczne i badania szyn po eksploatacji w torze pozwalają na następujące stwierdzenia:

1. Obecność normalnych naprężeń kontaktowych i zmiennych naprężeń stycznych powoduje zużycie elementów układu koło – szyna zarówno ścierno-adhezyjne, jak i zmęczeniowo-stykowe.
2. Intensywność zużycia eksploatacyjnego zależy m.in. od własności mechanicznych szyn, a w szczególności od ich twardości. Dla szyn o wysokiej twardości dominuje zużycie zmęczeniowo-stykowe, decydujące o ich trwałości. Natomiast dla szyn zwykłych bez obróbki o trwałości szyn decyduje zużycie ścierno-adhezyjne.
3. Szyny obrabiane cieplnie o podwyższonej twardości należy stosować przede wszystkim na odcinkach toru o bardzo dużych obciążeniach, co przy większym zużyciu ścierno-adhezyjnym ogranicza wielkość powstałych mikropęknięć podpowierzchniowych, a zarazem możliwość ich rozprzestrzeniania się w pęknięcia krytyczne.

## LITERATURA

- [1] Adamiec P., Dziubiński J., John A., 2002: Numerische Berechnungen der Kontaktspannungen in einem Rod-Schiene-System. 13<sup>th</sup> Int. Coll. Tribology, Esslingen, Germany (w druku).
- [2] Sitarz M., Adamiec P., Dziubiński J., 1998: Badanie możliwości naprawy uszkodzonych szyn obrobnionych cieplnie. Praca NB (nie publikowana). Politechnika Śląska, Katowice.
- [3] Adamiec P., Dziubiński J., John A., 2001: Ocena trwałości szyn. Mat. VIII Krajowej Konf. Mechaniki Pękania, Kielce.

## RAIL LIFE

### Summary

The paper presents the methodology of rail life evaluation; 332 HB rail wear following the heat treatment and 266 HB rail wear following no such treatments. Abrasive-and-adhesive rail wear and their wear due to contact fatigue were analysed. The rail life characteristics were offered using real life-rail wear measurements of the Silesian Management of District State Railways (DOKP). There was observed a favourable effect of a considerable rail hardness on their wear life, abrasion resistance, in specific, and no effect of rail hardness on contact fatigue.



## ZGRZEWANIE WYBUCHOWE METALI I JEGO NIEKTÓRE ZASTOSOWANIA

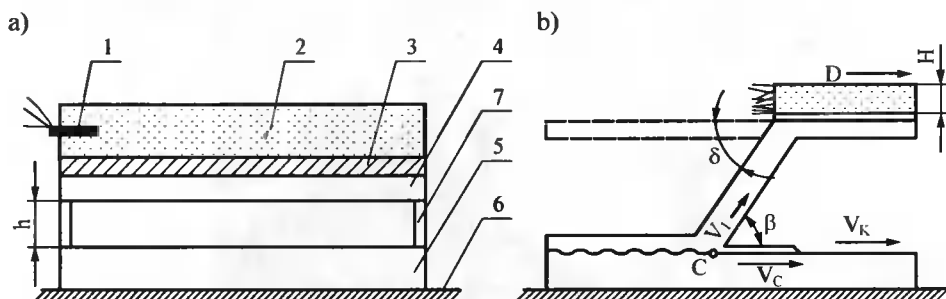
Włodzimierz Walczak

Politechnika Gdańska

Katedra Technologii Materiałów Maszynowych i Spawalnictwa  
ul. G. Narutowicza 11/12, 80-952 Gdańsk

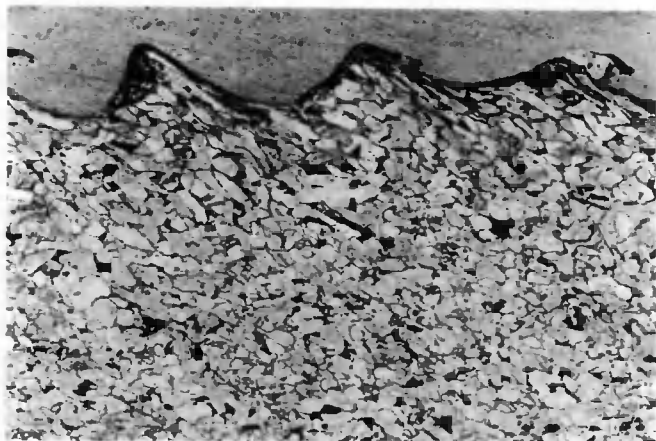
W artykule omówiono podstawy zgrzewania wybuchowego metali, opisano próby wytworzenia i zastosowania blach i elementów zgrzanych wybuchowo, a także podano sposób wytwarzania i wykorzystania łączników do spawania blach i rur z metali różnoimiennych.

Schemat ustawienia płyt do zgrzewania wybuchowego oraz przebiegu zgrzewania przedstawia rysunek 1.



Rys. 1. Schemat podstawowego układu zgrzewania oraz przebiegu zderzenia płyt zgrzewanych wybuchowo: 1 – detonator, 2 – materiał wybuchowy, 3 – podkładka ochronna, 4 – płyta nastrzeliana o grubości  $g_1$ , 5 – płyta podstawowa o grubości  $g_2$ , 6 – podłoże, 7 – kołki dystansowe,  $h$  – wstępna odległość pomiędzy powierzchniami zgrzewanych płyt,  $\beta$  – kąt zderzenia,  $V_c$  – prędkość przebiegu zderzenia równa, dla układu równoległego, prędkości detonacji materiału wybuchowego  $D$ ,  $H$  – wysokość warstwy materiału wybuchowego

Podstawowymi parametrami zgrzewania są: prędkość detonacji materiału wybuchowego  $D$  oraz kąt  $\beta$ , pod jakim zderzają się zgrzewane płyty, zwany kątem zderzenia. Parametrem uzupełniającym jest wstępna odległość pomiędzy powierzchniami zderzających się płyt  $h$ . Wymienione parametry oraz dodatkowo grubości zgrzewanych płyt  $g_1$  i  $g_2$  decydują o możliwości uzyskania połączenia i jego budowie [1, 2]. Poprawny dobór wszystkich tych wielkości pozwala na uzyskanie połączenia zgrzewanego wybuchowo o powierzchni falistej, która charakteryzuje się niewielkimi wymiarami powstałych fal oraz możliwie minimalną ilością obszarów tzw. warstwy pośredniej – rysunek 2.



Rys. 2. Fotografia zglądu mikroskopowego połączenia stali niskowęglowej z miedzią, charakteryzującego się pożądaną budową falistą z niewielkimi obszarami warstwy pośredniej. Powiększenie 50 $\times$ , trawiono HNO<sub>3</sub> i CrO<sub>3</sub>

Zmiana wartości któregośkolwiek z wymienionych parametrów zgrzewania powoduje zmiany w budowie połączenia, polegające bądź na zaniku falistości powierzchni połączenia, bądź na nadmiernym rozroście fal w połączeniu, powiązany zwykle z powstaniem licznych i rozległych obszarów kruchej warstwy pośredniej (rys. 3).



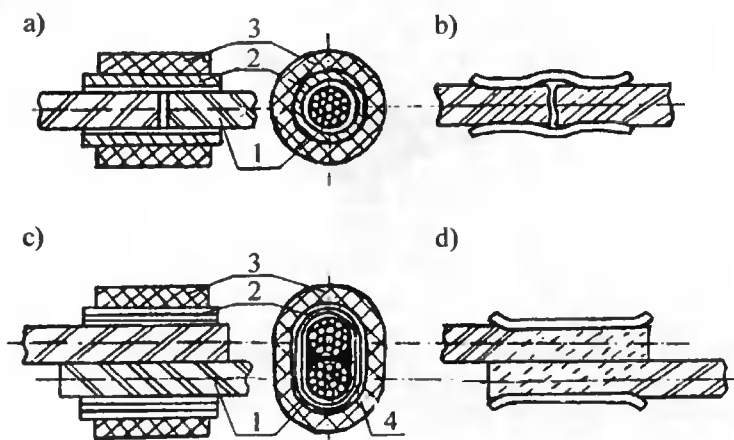
Rys. 3. Fotografia zglądu mikroskopowego połączenia stali niskowęglowej z miedzią, charakteryzującego się nadmiernym rozrostem fal oraz licznymi i dużymi obszarami warstwy pośredniej z widocznymi „jamami usadowymi”. Powiększenie 50 $\times$ , trawiono HNO<sub>3</sub>

Przedstawione zmiany w budowie połączenia prowadzą do zmiany jego wytrzymałości, przy czym wytrzymałość połączeń zgrzewanych wybuchowo określa się zwykle w oparciu o próbę odrywania lub ścinania. Poprawnie wykonane połączenia powinny charakteryzować się wytrzymałością na ścinanie i odrywanie nie mniejszą od wytrzymałości słabszego z łączonych metali lub stopów. Stanowi to podstawowe kryterium oceny połączeń zgrzewanych wybuchowo. Dodatkowo, w koniecznych przypadkach połączenia są oceniane w oparciu o próby twardości lub udarności.

Stosując wymienione kryteria opracowano technologię zgrzewania wybuchowego prawie wszystkich metali i stopów [2]. Technologie te zastosowano zarówno do łączenia elementów konstrukcji, jak i wytwarzania półfabrykatów przeznaczonych do dalszego przetwórstwa. Różnorodność i ilość tych zastosowań jest w obecnej chwili tak duża, że nie sposób je opisać w jednym artykule. Dlatego w niniejszym opracowaniu zostaną przedstawione tylko niektóre z nich i to głównie te, które wydają się mieć możliwości wykorzystania w transporcie, a głównie w kolejnictwie.

Do zastosowań takich należy w pierwszej kolejności zaliczyć wykorzystanie zgrzewania wybuchowego do łączenia wszelkiego typu przewodów elektrycznych.

Najprostszym z tych zastosowań jest łączenie lin i drutów, którego istotę najłatwiej można przedstawić na przykładzie połączenia dwu lin doczołowo lub na zakładkę – rysunek 4.



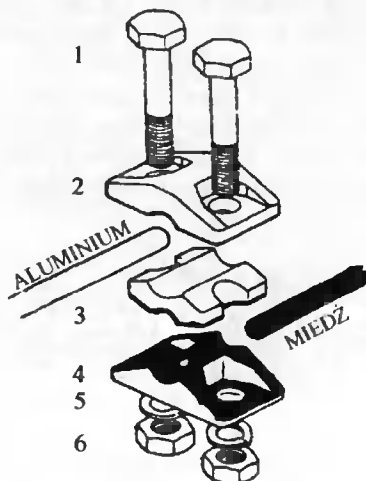
Rys. 4. Schematy przygotowania do łączenia (a, c) i połączenia dwu lin łączonych doczołowo (a, b) oraz na zakładkę (c, d);  
1 – łączone liny, 2 – element łączący – cienka metalowa blacha lub rura nastrzeliana na przewody, 3 – materiał wybuchowy

Proces polega na osadzeniu końców przewodów w elementach łączących i następnym umieszczeniu na powierzchni tych elementów warstwy materiału wybuchowego. W najprostszym przypadku może to być sznur detonacyjny.

Detonacja materiału wybuchowego powoduje, przebiegające z bardzo dużą prędkością obciskanie i częściowe zgrzanie elementów ze sobą. Uzyskane połączenia charakteryzują się wysokimi własnościami mechanicznymi i bardzo dobrą przewodnością elektryczną. Korzystne własności elektromechaniczne nie ulegają pogorszeniu w procesie eksploatacji, co powoduje, że połączenia nie wymagają kontroli i remontów. Przedstawiona metoda umożliwia łączenie różnych przewodów. Znane są przypadki łączenia przewodów miedzianych i brązowych o przekrojach 95-120 mm<sup>2</sup>, aluminiowych (50-240 mm<sup>2</sup>), elastycznych miedzianych (50-120 mm<sup>2</sup>), stalowo-miedzianych i stalowo-aluminiowych (95-240 mm<sup>2</sup>) [3].

Innym przykładem łączenia przewodów jest wykorzystanie blachy platerowanej wybuchowo jako elementu zacisku odgałęźnego Al-Cu opracowanego w Politechnice Gdańskiej – rysunek 5 [4]. Zacisk ten umożliwi mechaniczne połączenie pomiędzy przewodami aluminiowymi i miedzianymi. Elementy pośrednie zacisku wykonano za pomocą obróbki plastycznej z blachy aluminiowej platerowanej wybuchowo blachą

miedzianą. Umożliwia to bezpośredni styk przewodu miedzianego z warstwą miedzianego plateru, zaś aluminium z aluminium częścią elementu pośredniego. Rozwiązanie takie charakteryzuje się znakomitą przewodnością elektryczną oraz znakomitą odpornością korozyjną, eliminującą konieczność napraw i wymiany zacisków.



Rys. 5. Zacisk odgałęźny Al-Cu do łączenia przewodów aluminiowych ze stalowymi: 1 – śruby M6, 2 – element zewnętrzny z Al, 3 – element pośredni z blachy Al-Cu zgrzanej wybuchowo, 4 - element zewnętrzny z blachy Al-Cu zgrzanej wybuchowo, 5, 6 – podkładka sprężysta i nakrętka, nie oznakowane – łączone przewody z miedzi i aluminium

Bardzo ciekawym rozwiązaniem łączenia przewodów wydaje się być, opracowane i opatentowane w Politechnice Gdańskiej [6], zgrzewanie wybuchowe łączników sieci trakcyjnej z szynami – rysunek 6.

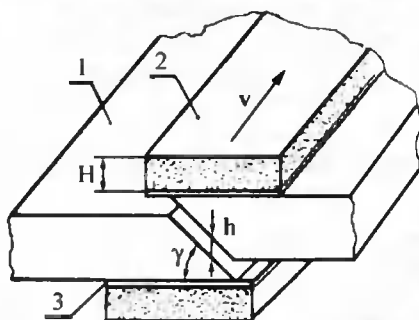


Rys. 6. Łącznik szynowy połączony z szynami za pomocą zgrzewania wybuchowego

Łączniki stosowane w tej metodzie muszą odznaczać się odpowiednią konstrukcją. Obydwa końce liny miedzianej osadzone są poprzez zaciskanie w końcówce z blachy

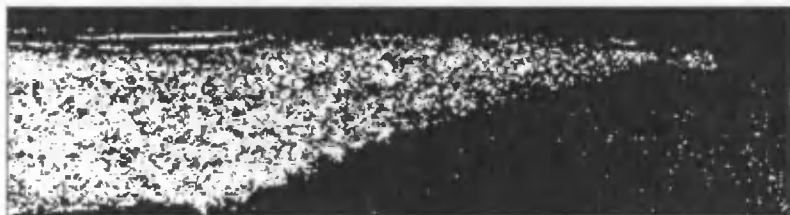
lub płaskownika miedzianego, zwykle o grubości 2-3 mm. Płaski element końcówki, zwykle o wymiarach 30/90 mm, przeznaczony jest do zgrzewania z szyną. Przeprowadzenie procesu zgrzewania utrudniają małe wymiary końcówki oraz ograniczona (poprzez zamocowaną linę) swoboda ruchu. Mając na uwadze powyższe, opracowano specjalną technologię zgrzewania, która umożliwiła uzyskanie połączeń o bardzo dobrych własnościach mechanicznych oraz dużej przewodności elektrycznej i trwałości. Istotą opisanej metody łączenia jest zasadniczo typowy proces zgrzewania wybuchowego zaadaptowany jedynie do warunków, w jakich należy wykonać połączenie.

Nieco innym układem, który można zastosować do łączenia przewodów zasilających i uziemiających w postaci taśm, jest układ przedstawiony schematycznie na rysunku 7. Układ ten pozwala na uzyskanie połączeń pomiędzy większością metali i ich stopów.



Rys. 7. Schemat ustawienia elementów w układzie do zgrzewania pasów blach i taśm: 1 – zgrzewane blachy, 2 – materiał wybuchowy, 3 – podkładka ochronna,  $v$  – prędkość i kierunek detonacji materiału wybuchowego,  $H$  – wysokość warstwy materiału wybuchowego,  $h$  – odległość pomiędzy zgrzewanymi powierzchniami blach,  $\gamma$  – kąt zukosowania krawędzi zgrzewanych blach

Przedstawiony układ wykorzystano w ITMMiS PG [5] do prób zgrzewania taśm z Al + Al, Cu + Cu oraz Al + stal. Próby przeprowadzone na blachach o grubości 10 mm miały na celu ustalenie parametrów zgrzewania oraz zbadanie własności i budowy uzyskanych połączeń. W wyniku prób ustalono optymalne parametry zgrzewania oraz optymalny kąt ukosowania blach wynoszący  $20^\circ$ . Uzyskane przy ustalonych parametrach połączenia charakteryzowały się bardzo dobrymi własnościami wytrzymałościowymi (próbki zerwane poza obszarem połączenia) i budową strukturalną charakterystyczną dla zgrzein wybuchowych – rysunek 8.

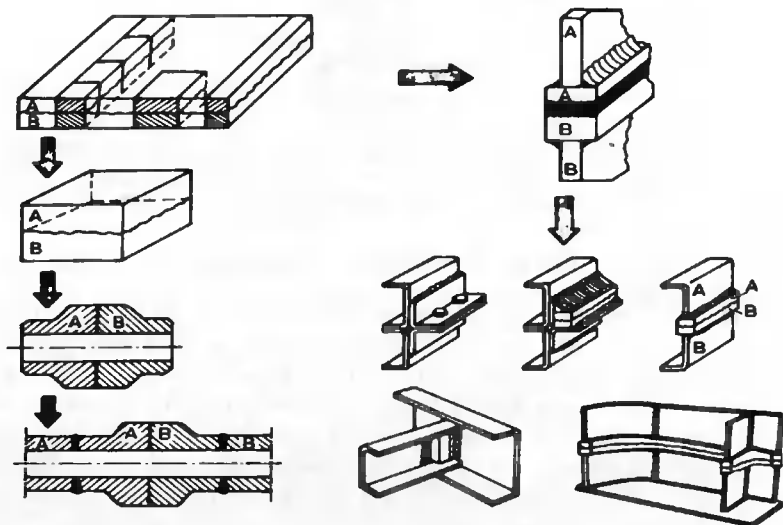


Rys. 8. Fotografia zglądu mikroskopowego zgrzeiny wybuchowej pomiędzy aluminium i stalą wykonanej przy kącie ukosowania blach  $20^\circ$  i optymalnych parametrach zgrzewania. Powiększenie 50x

Bardzo ciekawym i cieszącym się wciąż wzrastającym zainteresowaniem przemysłu zastosowaniem zgrzewania wybuchowego są łączniki. W technice istnieje często konieczność wykonania połączeń spawanych pomiędzy szeregiem metali i stopów różniamiennych. Wykonanie takich połączeń pomiędzy blachami i rurami, których wzajemna spawalność jest dobra, nie napotyka na trudności. Szereg metali i stopów jest jednak wzajemnie nie spawalnych. Należy wówczas poszukiwać innych rozwiązań.

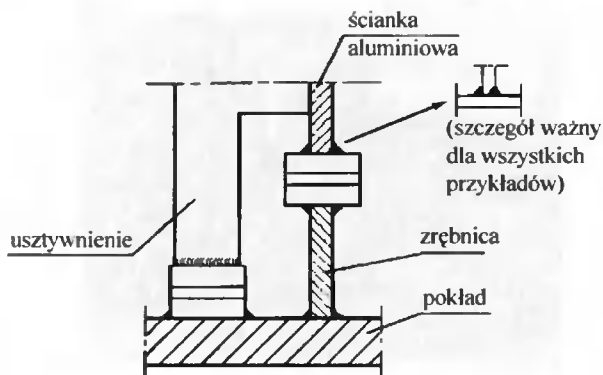
Znaczącą rolę w poszukiwaniu takich rozwiązań odgrywa w ostatnich latach zgrzewanie wybuchowe jako metoda rozszerzająca zakres możliwych do połączenia ze sobą metali i stopów [2]. W oparciu o zgrzewanie wybuchowe istnieje możliwość wytworzenia elementów pośrednich tzw. łączników, umożliwiających połączenie ze sobą (za pomocą spawania) dwu wzajemnie niespawalnych metali lub stopów.

Idea wytwarzania i zastosowania łączników jest prosta. Polega ona na zgrzaniu wybuchowym płyt dwu- lub wielowarstwowych o odpowiedniej grubości z metali wzajemnie ze sobą niespawalnych A i B. Z płyt takich (rys. 9) wycinane są następnie elementy (płaskownicy lub prostopadłości), które po odpowiedniej obróbce uzyskują zaplanowany kształt łącznika wzdłużnego lub rurowego. W następnej kolejności łącznik ten jest spawany z blachami lub rurami w ten sposób, aby spawane ze sobą były te same metale.



Rys. 9. Schemat wycinania, przetwarzania i zastosowania łączników do spawania dwu wzajemnie ze sobą niespawalnych metali A i B w postaci blach lub rur

Wytworzone w opisany sposób łączniki są stosowane z powodzeniem przez prawie wszystkie stocznie krajowe do łączenia różnego typu elementów stalowych z elementami ze stopu AlMg4,5Mn, a w szczególności do łączenia stalowych pokładów z nadbudówkami ze stopów Al [2] – rysunek 10.



Rys. 10. Klasyczne zastosowanie łączników do spawania nadbudówki za stopu AlMg4,5Mn ze stalowym pokładem statku

Inne ich zastosowanie to np. łączenie aluminiowego trzpienia ze stalową konstrukcją anody w elektrolizerach aluminium lub łączenie elementu doprowadzającego prąd (Cu) do stalowej ściany elektrolizera chloru.

Znacznie mniej rozpowszechnione jest zastosowanie łączników do spawania rur. Przeprowadzone w KTMMiS PG badania [7] wskazują, że z powodzeniem można wytworzone z blach zgrzanych wybuchowo łączniki stosować do spawania rur stalowych z rurami miedzianymi i aluminiowymi. Warunkiem uzyskania poprawnych połączeń jest właściwy dobór stosunku średnicy łącznika do średnicy rury, który np. dla spawania rur stalowych z rurami ze stopu AlMg4,5Mn wynosi 4, zaś dla spawania rur miedzianych ze stalowymi równa się 2. Wykonane przy zachowaniu tego warunku połączenia rurowe poddane próbie rozciągania złącz ulegają zniszczeniu w rurze, rysunek 11.



Rys. 11. Połączenie rury stalowej z rurą aluminiową za pomocą łącznika po przeprowadzonej próbie rozciągania

Przedstawione zastosowania nie wyczerpują oczywiście wszystkich możliwych zastosowań zgrzewania wybuchowego. Znane są zastosowania tej metody do wytwarzania szcęk zgrzewarek doczołowych ze stali platerowanej miedzią (rys. 12), ścian sitowych ze stali platerowanej miedzią, niklem, mosiądzem, monelem i tytanem, styków elektrycznych (Cu + Ag) i wiele, wiele innych [1, 2], które polecam uwadze specjalistów spajania w kolejnictwie, jako możliwe do zastosowania w tej dziedzinie.



Rys. 12. Szczęki zgrzewarki doczołowej z blachy stalowej platerowanej wybuchowo blachą miedzianą

## LITERATURA

- [1] Chládek L., Nemecek J., Vacek J., 1979: Vybuchove svarovani kovu a pribuzne procesy. SNTL Praha.
- [2] Walczak W., 1989: Zgrzewanie wybuchowe metali i jego zastosowania. WNT Warszawa.
- [3] Walczak W., 1993: Wykorzystanie zgrzewania wybuchowego do łączenia przewodów elektrycznych. Przegląd Spawalnictwa 3.
- [4] Walczak W. i inni: Zacisk odgałęźny Al-Cu. Patent RP. Zgłoszenie nr P-273208.
- [5] Walczak W., Walczak J., 1992: Zgrzewanie wybuchowe jako metoda łączenia pasów blach z Al i Cu. 5 Konferencja Spawalnicza Energetyków, Opole.
- [6] Myśliwiec M. i inni, 1991: Łącznik kątowy sieci trakcyjnej. Biuletyn Urzędu Patentowego nr 19/563.
- [7] Walczak W., 2001: Spawanie rur z metali różnoimiennych. Przegląd Spawalnictwa 10-11.

## EXPLOSIVE METAL WELDING AND SELECTED APPLICATIONS

### Summary

The article discusses explosive metal welding and experiments with plates and explosive-welded components. The method is offered to be used in the production and application of transition connectors for heterogeneous-metal plate and pipe fusion welding.



## PODEJŚCIE PROCESOWE DO ZARZĄDZANIA JAKOŚCIĄ WYTWARZANIA WYROBÓW I KONSTRUKCJI SPAWANYCH

Andrzej Zajac

Politechnika Krakowska, Zakład Spawalnictwa  
Instytutu Materiałoznawstwa i Technologii Metali  
al. Jana Pawła II nr 37, 31-864 Kraków

Przeanalizowano zmiany wprowadzone do trzeciej edycji norm serii PN ISO 9000:2001 i podjęto próbę odniesienia wymagań zawartych w tych normach do procesów wytwarzania wyrobów i konstrukcji spawanych. Na tej podstawie wykazano pełną celowość przeprowadzania oceny i certyfikacji wytwórców wyrobów i konstrukcji spawanych zgodnie z serią norm PN-EN 729:1997 oraz kwalifikowania i certyfikowania personelu nadzoru spawalniczego, personelu bezpośrednio wykonującego prace spawalnicze oraz personelu przeprowadzającego badania zgodnie z odpowiednimi normami europejskimi. Przedstawiono przykłady ilustrujące punkty zbieżne wymagań norm serii ISO 9000 i norm europejskich dotyczących wymagań jakościowych w spawalnictwie. Podsumowano rozważane zagadnienie.

### I. WPROWADZENIE

Ukazanie się w 1987 roku serii norm międzynarodowych ISO 9000 oraz przyjęcie ich w tym samym roku w krajach członkowskich Unii Europejskiej, a następnie w Polsce w 1993 roku, stanowiło istotny krok w zakresie regulacji i ujednoczenia podejścia do zapewnienia jakości wyrobów i usług. Normy tej serii zawierały bowiem kompleksowe spojrzenie na całokształt zagadnień występujących w działalności gospodarczej, które wywierają wpływ na efekt końcowy tych działań, a więc produkt lub usługę, od których konkretny klient czy ogólnie rynek oczekuje określonych cech i charakterystyk wyrażonych w zamówieniu lub oczekiwanych przez przyszłych użytkowników. **Zasadniczą ideą, na której oparte były normy ISO serii 9000 był uniwersalizm.**

Wszystkie wymagania podane w normach tej serii są ogólne i przeznaczone do stosowania przez wszystkie organizacje, bez względu na ich rodzaj, wielkość i dostarczany wyrób lub usługę. Normy te mogą więc odnosić się zarówno do produkcji rolnej, wytwarzania urządzeń i maszyn czy produkcji czekolady lub proszku do prania.

Należy podkreślić, że zgodnie z intencją autorów norm, w żadnym przypadku nie mają one jednak na celu normalizowania systemów jakości wprowadzanych w organizacjach gospodarczych, a jedynie ujednoczenie wielu różnych sposobów podejścia do zagadnień jakości.

Z tego punktu widzenia omawiane normy dobrze spełniają rolę przewodnika wskazującego metodykę postępowania w przypadkach tworzenia systemu zapewnienia jakości w organizacjach gospodarczych, wskazują najistotniejsze elementy działań mających wpływ na systematyczne uzyskiwanie produktów spełniających żądania lub oczekiwania klientów.

Obecnie normy serii ISO 9000 mają już formalnie swoją ponad 15. letnią historię, która odzwierciedla kolejne kroki zmierzające do stałego doskonalenia systemu pozwalającego nie tylko zapewnić żadaną i oczekiwaną przez klienta jakość wyrobów czy usług, ale także na zarządzania jakością. Zestawienie kolejnych edycji serii norm ISO 9000 podano w tablicy 1.

Tablica 1. Kolejne edycje serii norm ISO 9000

ISO	CEN	PKN
<b>Edycja I</b>		
ISO 8402:1986	EN 28402:1991	PN-EN 28402:1993
Seria ISO 9000:1987	Seria EN 29000:1987	Seria PN-EN 29000:1993
<b>Edycja II</b>		
ISO 8402:1994	EN ISO 8402:1995	PN-EN ISO 8402:1996
Seria ISO 9000:1994	Seria EN ISO 9000:1994	Seria PN-EN ISO9000:1996
<b>Edycja III</b>		
ISO 9000:2000 zastępuje ISO 8402:1994	EN ISO 9000:2000 zastępuje EN ISO 8402:1995	<b>PN-EN ISO 9000:2001</b> zastępuje PN-EN ISO 8402:1996
ISO 9001:2000 zastępuje ISO 9001:1994 ISO 9002:1994 ISO 9003:1994 oraz uwzględnia zasady podane w EN ISO 9000:1994 i EN ISO 9004:1994	EN ISO 9001:2000 zastępuje EN ISO 9001:1994 EN ISO 9002:1994 EN ISO 9003:1994 oraz uwzględnia zasady podane w EN ISO 9000:1994 i EN ISO 9004:1994	<b>PN-EN ISO 9001:2001</b> zastępuje PN-EN ISO 9001:1996 PN-EN ISO 9002:1996 PN-EN ISO 9003:1996 oraz uwzględnia zasady podane w PN-EN ISO 9000:1996 i PN-EN ISO 9004:1996

Najistotniejszą zmianą wprowadzoną do najnowszej wersji serii norm ISO 9000:2000, wydanej w Polsce we wrześniu 2001 jako **PN-EN ISO 9000:2001** i **PN-EN ISO 9001:2001**, jest przyjęcie zasady tzw. **podejścia procesowego**, czyli powiązania ze sobą licznych działań wykorzystujących zasoby i zarządzanie w celu umożliwienia uzyskania jak najlepszego efektu – produktu. Zaletą podejścia procesowego jest zapewnienie bieżącego nadzoru nad powiązaniem między poszczególnymi procesami w systemie procesów, jak też nad ich kombinacją i wzajemnym oddziaływaniem.

Nowe podejście do zagadnień jakości ujęte w skali międzynarodowej serią norm **ISO 9000 dotyczy także wszelkich procesów spawalniczych**.

W edycjach I i II norm serii ISO 9000 pojęcie procesu specjalnego jest zdefiniowane i szeroko wyjaśnione w następujący sposób:

**Procesy specjalne są to takie procesy, których wyniki nie mogą być w pełni zweryfikowane podczas późniejszej kontroli i badania wyrobu oraz, jeżeli na przykład wady powstałe podczas procesu mogą wystąpić dopiero podczas użytkowania wyrobu.**

W związku z tym jest konieczne ciągłe monitorowanie tych procesów i/lub zachowanie zgodności z udokumentowanymi procedurami w celu zapewnienia spełnienia ustalonych wymagań. Procesy specjalne powinny podlegać kwalifikacji i być realizo-

wane przez wykwalifikowanych pracowników. Zapisy dotyczące kwalifikowanych procesów, wyposażenia i personelu powinny być przechowywane.

Zgodnie z zapisem punktu 4.9 „Sterowanie procesem” norm PN-ISO 9001:1996 i PN-ISO 9002:1996:

Dostawca powinien określić i zaplanować produkcję oraz, jeżeli jest to potrzebne, procesy instalowania, które w sposób bezpośredni wpływają na jakość oraz powinien zapewnić, aby te procesy były przeprowadzane w nadzorowanych warunkach, na które składają się następujące elementy:

- a) udokumentowane procedury określające sposób produkcji i instalowania i serwisu, jeżeli brak takich procedur mógłby mieć niekorzystny wpływ na jakość;
- b) stosowanie odpowiedniego wyposażenia do produkcji, instalowania i serwisu oraz zapewnienie odpowiedniego środowiska pracy;
- c) zgodność z odpowiednimi normami/kodeksami, planami jakości i/lub udokumentowanymi procedurami;
- d) monitorowanie i nadzorowanie odpowiednich parametrów procesu i cech wyrobów;
- e) zatwierdzenie procesów i wyposażenia, jeżeli jest to uzasadnione;
- f) kryteria wykonania, które powinny być określone tak szczegółowo, jak to jest praktycznie potrzebne (np. pisemne unormowania, reprezentatywne próbki lub ilustracje);
- g) odpowiednie obsługiwane wyposażenia, aby zapewnić stałą zdolność procesów.

Także w normie PN-ISO 9004-1 „Zarządzanie jakością i elementy systemu jakości – Wytyczne” w punkcie 11.4. „Zarządzanie sterowaniem procesami” znajdują się między innymi zapisy:

W pewnych przypadkach, np. tam gdzie niedostatki procesu ujawniają się dopiero po wejściu wyrobu do użytku, wyniki procesów nie mogą być bezpośrednio zweryfikowane przez kolejne kontrole lub badania wyrobu – wymagana jest kwalifikacja wstępna procesu w celu zapewnienia zdolności procesu i kontrolowania zmiennych krytycznych podczas jego trwania.

Zaleca się, aby:

- 1) procesy ważne dla jakości wyrobu były planowane, zatwierdzane, monitorowane i nadzorowane,
- 2) zwrócić szczególną uwagę na charakterystyki wyrobu, które nie mogą być zmierzone w łatwy sposób lub bez ponoszenia nadmiernych kosztów, oraz na charakterystyki wymagające specjalnych umiejętności,
- 3) zmienne procesu były monitorowane, kontrolowane i weryfikowane z odpowiednią częstością w celu potwierdzenia:
  - a) dokładności i zmienności używanego wyposażenia;
  - b) umiejętności, zdolności i wiedzy operatorów;
  - c) dokładności wyników pomiarów i danych użytych do sterowania procesem;
  - d) środowiska procesu i innych czynników wpływających na jakość, takich jak czas, temperatura i ciśnienie;
  - e) odpowiedniego udokumentowania zmiennych procesowych, wyposażenia i personelu.

W obecnej III edycji normy PN-EN ISO 9000:2001 proces specjalny określony jest bardzo lapidarnie i to tylko w postaci uwagi 3 do definicji procesu:

**„Proces, w którym zgodność (czyli spełnienie wymagań – przypis AZ) otrzymanego wyrobu (czyli wyniku procesu – przypis AZ) nie może być sprawdzona łatwo lub ekonomicznie, często jest określane jako proces specjalny”.**

Zapis powyższy jest jasny jedynie dla osób dobrze znających poprzednie edycje norm serii ISO 9000 i posiadających duże doświadczenie w zarządzaniu jakością oraz prowadzeniu produkcji spawalniczej. Niestety, dla osób o mniejszym doświadczeniu może być jedynie drobną uwagą o nie do końca zrozumiałym znaczeniu, co w praktyce może prowadzić do nieporozumień z klientem lub stroną trzecią oraz być przyczyną poniesienia nieuzasadnionych kosztów lub nie wywiązania się z kontraktu.

Na szczęście, ze względu na szczególną specyfikę procesów spawalniczych, które są klasycznym przypadkiem procesów specjalnych, w ostatnich latach powstało szereg dokumentów i norm o charakterze europejskim (regionalnym) i światowym, stwarzających podstawę do budowania systemu zarządzania jakością, zapewnienia jakości i stawiających jednolite wymagania dotyczące wykonywania, nadzorowania i dokumentowania prac spawalniczych, kwalifikowania i certyfikowania personelu wykonawczego, nadzorującego oraz wykonującego badania nieniszczące, a także odnośnie metod oceny jakości uzyskanych złączy i wyrobów.

Zasadnicze znaczenie w tym względzie posiada seria norm EN 729:1994 i z tego względu zostanie szerzej omówiona w dalszej części niniejszego artykułu.

## 2. WYMAGANIA DOTYCZĄCE JAKOŚCI W SPAWALNICTWIE

Traktowanie procesów spawalniczych jako procesów specjalnych spowodowało konieczność wypracowania odpowiedniego systemu działań, nie tylko ograniczającego się do kontroli i badań gotowych wyrobów, ale pozwalającego uzyskać większą pewność, że prawdopodobieństwo wystąpienia wad i niedoskonałości w wykonywanych połączeniach spajanych jest niewielkie, za wyjątkiem ewentualnych błędów przypadkowych i wynikających z nieprzestrzegania przyjętych reguł lub z niepełnego jeszcze stanu wiedzy i ograniczeń wynikających z obecnego poziomu techniki.

W przypadku konstrukcji i wyrobów spawanych, po to aby mogły one być stosowane zgodnie z ich przeznaczeniem oraz nie stwarzały poważniejszych problemów podczas wytwarzania i eksploatacji, niezbędnym jest dysponowanie odpowiednimi wytycznymi i uregulowaniami technicznymi oraz normami, precyzującymi szczegółowo te kwestie, które w istotny sposób wpływają na jakość wytwarzanych wyrobów. Oczywiście punktem wyjścia do wszelkich działań są normy wyrobów, a w przypadku ich braku uzgodnienia z klientem lub przyszłym użytkownikiem.

Odnośnie wymagań dotyczących jakości w spawalnictwie podstawowe znaczenie posiada opracowana przez Komitet Techniczny TC 121 i przyjęta przez CEN w 1994 roku seria norm EN 729.

Polska wersja językowa serii tych norm – PN-EN 729 – uzyskała status Polskich Norm w 1997 r. i składa się z następujących arkuszy:

**PN-EN 729-1 : 1997 Spawalnictwo. Spawanie metali.**

**Część 1: Wytyczne doboru wymagań dotyczących jakości i stosowania**

**PN-EN 729-2 : 1997 Spawalnictwo. Spawanie metali.**

**Część 2: Pełne wymagania dotyczące jakości w spawalnictwie**

**PN-EN 729-3 : 1997 Spawalnictwo. Spawanie metali.**

**Część 3: Standardowe wymagania dotyczące jakości w spawalnictwie**

**PN-EN 729-4 : 1997 Spawalnictwo. Spawanie metali.**

**Część 4: Podstawowe wymagania dotyczące jakości w spawalnictwie**

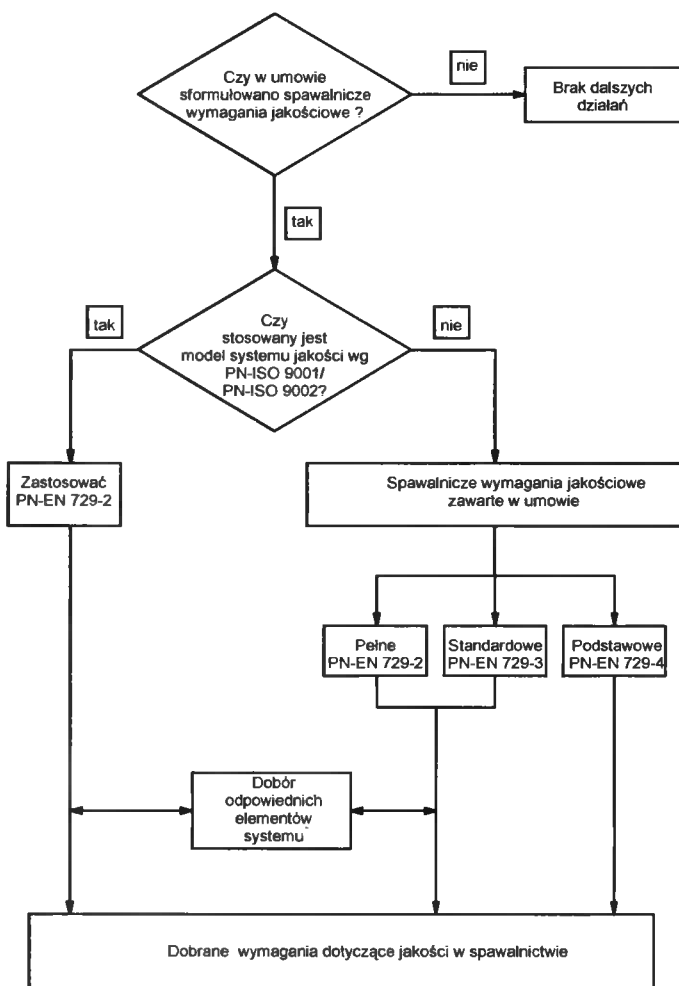
Jak widać z zestawienia tytułów części norm serii PN-EN 729 wprowadzone zostały trzy poziomy wymagań dotyczące jakości przy wytwarzaniu konstrukcji i wyrobów spawanych oraz wykonywaniu usług spawalniczych, a mianowicie:

- pełne wymagania (ang. comprehensive quality requirements) - PN-EN 729-2,
- standardowe wymagania (ang. standard quality requirements) - PN-EN 729-3,
- podstawowe wymagania (ang. elementary quality requirements) - PN-EN 729-4.

Dobór poziomu wymagań dotyczących jakości w produkcji spawalniczej uzależniony jest w pierwszym rzędzie od dwu zasadniczych elementów:

- ❑ żądań klienta (odbiorcy) – czyli ustalenia, czy klient określił w umowie spawalnicze wymagania jakościowe,
- ❑ istniejącego stanu faktycznego w wytwórni – tzn. od tego, czy wytwórca posiada opracowany i stosuje u siebie model systemu zapewniania jakości odpowiadający wymogom normy z serii PN-ISO 9000.

Algorytm doboru wariantu postępowania w tych przypadkach podaje rysunek 1.



Rys. 1. Algorytm doboru wymagań dotyczących jakości w spawalnictwie wg PN-EN 729-1: 1997

- ◆ W przypadku, gdy klient nie określił spawalniczych wymagań jakościowych – spełnienie wymagań zawartych w normach PN-EN 729 nie jest wymagane. W związku z tym konkretne wymagania dotyczące wyrobów będących przedmiotem sporządzanej umowy muszą być ustalone i wprowadzone do umowy.
- ◆ W przypadku, gdy wytwórca nie posiada wdrożonego systemu zapewnienia jakości zgodnie z PN-ISO 9001 lub PN-ISO 9002 (obecnie tylko 9001), a wymagania dotyczące jakości w spawalnictwie są określone przez klienta, zachodzi konieczność uzgodnienia, który poziom wymagań zapewnienia jakości w spawalnictwie będzie wymagany (PN-EN 279-2, PN-EN 279-3, PN-EN 279-4).
- ◆ W przypadku, gdy wytwórca opanował i stosuje system zapewnienia jakości zgodnie z normami PN-ISO 9001 lub PN-ISO 9002 (obecnie tylko 9001), a w umowie są sprecyzowane wymagania dotyczące jakości w spawalnictwie, należy stosować wymagania zgodne z PN-EN 729-2.

Porównanie zakresu działań dotyczących jakości przy prowadzeniu prac spawalniczych zgodnie z określonym poziomem wymagań przedstawiono w tablicy 2.

Tablica 2. Porównanie zakresu działań dotyczących jakości przy prowadzeniu prac spawalniczych zgodnie z określonym poziomem wymagań

Części PN-EN 729 Rodzaj działań	PN-EN 729-2 (pełne wymagania jakościowe)	PN-EN 729-3 (standardowe wymagania jakościowe)	PN-EN 729-4 (podstawowe wymagania jakościowe)
1	2	3	4
przegląd umowy	pełny udokumentowany przegląd	mniej rozległy przegląd	ustala, że ma być zdolność i informacje mają być dostępne
przegląd projektu	projekt ma być sprawdzony pod względem spawania		
podwykonawca	traktowany jak główny wytwórca		musi spełniać wymagania normy
spawacze/operatorzy	uprawnienia zgodne z PN-EN 287 i PN-EN 1418		
koordynacja spawania	personel koordynujący spawanie z odpowiednią wiedzą techniczną zgodną z PN-EN 719, lub osoby z podobną wiedzą		wymagana jest tylko personalna odpowiedzialność wytwórcy
personel kontrolujący	wystarczający i kompetentny personel ma być dostępny		wystarczający i kompetentny, dostęp dla inspektorów zewnętrznych, jeśli wymagany
personel badań nieniszczących	wystarczający i kompetentny personel ma być dostępny, kwalifikowany i certyfikowany zgodnie z PN-EN 473		
wyposażenie do produkcji	wymagane do przygotowania, cięcia, spawania, transportu, podnoszenia łącznie z urządzeniami bezpieczeństwa i odzieżą ochronną		brak określonych wymagań
konserwacja sprzętu	ma być przeprowadzana, konieczny jest plan konserwacji	brak określonych wymagań, muszą być odpowiednie	brak wymagań
plan produkcji	konieczny	ograniczony plan jest konieczny	brak wymagań
instrukcje technologiczne spawania (WPS)	instrukcje mają być dostępne dla spawaczy		brak wymagań
uznanie instrukcji technologicznych spawania (WPS)	zgodne z serią norm EN 288, uznane, jeśli wymagane przez stosowną normę lub umowę		brak określonych wymagań

cd. tablicy 2

1	2	3	4
instrukcje robocze	instrukcje technologiczne spawania (WPS) lub instrukcje specjalne powinny być dostępne		brak wymagań
dokumentacja	konieczna	nie określono	brak wymagań
badania seryjne materiałów dodatkowych do spawania	jeśli określono w umowie	nie określono	brak wymagań
przechowywanie i przenoszenie materiałów dodatkowych do spawania	przynajmniej wymagania dostawcy		
magazynowanie materiałów podstawowych	wymagana ochrona przed wpływem środowiska		brak wymagań
obróbka cieplna po spawaniu	warunki techniczne i kompletna dokumentacja jest konieczna	potwierdzenie zgodności z warunkami technicznymi konieczne	brak wymagań
kontrole przed, w trakcie i po spawaniu	zgodnie z wymaganiami dla określonych operacji		brak wymagań
niezgodności	procedury mają być dostępne		
wzorcowanie	procedury muszą być dostępne	nie określono	
oznaczenia	wymagane, jeśli właściwe	wymagane, jeśli konieczne	nie określono
identyfikowalność	muszą być dostępne dla spełnienia przepisów dotyczących niezawodności produktu		zgodnie z wymaganiami umowy
zapisy dotyczące jakości	przechowywanie przez minimum 5 lat		

Z powyższego zestawienia wyraźnie wynika, że konieczne rodzaje działań związanych z zarządzaniem jakością i zapewnieniem jakości, dla czynników zasadniczych są takie same lub bardzo zbliżone dla wszystkich poziomów wymagań; różnice występują tylko w odniesieniu do działań, których wpływ na jakość wyrobu w danym przypadku jest zdecydowanie mniej istotny i/lub nie jest ujęty w normie wyrobu, warunkach podanych przez zamawiającego lub stronę trzecią lub nie został ujęty w umowie.

### 2.1. Rodzaje działań wynikające ze stosowania pełnych wymagań dotyczących jakości w spawalnictwie

Zgodnie z normą PN-EN 729-2:1997 pełne wymagania dotyczące jakości w spawalnictwie pociągają za sobą konieczność uwzględniania w fazie planowania i przygotowania, oraz praktycznego dokonywania i dokumentowania działań podanych w tablicy 3. W tablicy tej wprowadzono kolumnę stanowiącą próbę przyporządkowania wymagań dotyczących jakości w spawalnictwie wg PN-EN 729:1997 elementom z normy PN-ISO 9001:2001.

Tablica 3. Rodzaje działań w przypadku stosowania pełnych wymagań dotyczących jakości w spawalnictwie

Lp.	Punkt PN-EN 729-2: 1997	Rodzaj działań	Punkt PN-EN ISO 9001: 2001
1.	4 4.1. 4.2. 4.3.	<b>Przegląd umów i projektów</b> Wymagania ogólne Przegląd umowy Przegląd projektu	5.2 + 7.2 + 7.3
2.	5.	<b>Podwykonawstwo, zakupy</b>	7.4
3.	6. 6.1. 6.2. 6.3.	<b>Personel spawalniczy</b> Wymagania ogólne Spawacze Personel nadzoru spawalniczego	6.2
4.	7. 7.1. 7.2.	<b>Personel kontrolujący, wykonujący próby i badania</b> Wymagania ogólne Personel wykonujący badania nieniszczące	6.2
5.	8. 8.1. 8.2. 8.3. 8.4. 8.5.	<b>Wyposażenie</b> Urządzenia do produkcji i badań Opis urządzeń Przydatność (odpowiedniość) urządzeń Urządzenia nowe Utrzymanie ruchu (konserwacja)	6.3
6.	9. 9.1. 9.2. 9.3. 9.4. 9.5.	<b>Produkcja spawalnicza</b> Plan produkcji Instrukcja technologiczna spawania (WPS) Uznanie technologii spawania Instrukcje robocze Dokumentacja	7.5
7.	10. 10.1. 10.2. 10.3.	<b>Materiały dodatkowe do spawania</b> Wymagania ogólne Badania partii Magazynowanie	7.4
8.	11.	<b>Składowanie materiałów podstawowych</b>	7.4
9.	12.	<b>Obróbka cieplna po spawaniu</b>	7.5
10.	13. 13.1. 13.2. 13.3. 13.4. 13.5.	<b>Kontrola i badania dotyczące spawania</b> Wymagania ogólne Kontrola i badania przed spawaniem Kontrola i badania podczas spawania Badania i badania po spawaniu Status kontroli i badań	7.1 + 8.1 + 8.2.4 + 7.5.3
11.	14.	<b>Niezgodności i działania korygujące</b>	8.3 + 8.5.2 + 8.5.3
12.	15.	<b>Wzorcowanie</b>	7.6
13.	16.	<b>Oznaczanie i identyfikowalność</b>	7.5.3
14.	17.	<b>Zapisy dotyczące jakości</b>	4.2.4

Podane w tablicy 3 wzajemne przyporządkowanie rodzaju działań zapisom w porównywanych normach w wielu przypadkach ma charakter tylko sygnalizacyjny, a nie bezpośredniej odpowiedniości, co związane jest z ogólnością zapisów normy ISO 9001. Trzeba dobrze znać specyfikę produkcji spawalniczej i biele orientować się w normach



dotyczących tej dziedziny technik oraz korzystać z norm w nich powołanych, aby znaleźć korelacje zapisów oraz spełnić niezbędne wymogi dla poprawnego przeprowadzenia procesu wytwarzania zgodnie z zasadami zarządzania jakością.

A oto dowolnie wybrane przykłady:

PN-EN 729-2	Rodzaj działań	PN-EN ISO 9001:2001
6. 6.1.  6.2. 6.3.	<b>Personel spawalniczy</b> Wymagania ogólne  Spawacze Personel nadzoru spawalniczego	<b>6.2 Zasoby ludzkie</b> Personel wykonujący pracę wpływającą na jakość wyrobu powinien być kompetentny na podstawie odpowiedniego wykształcenia, szkolenia, umiejętności i doświadczenia
8.  8.1. 8.2. 8.3. 8.4. 8.5.	<b>Wyposażenie</b>  Urządzenia do produkcji i badań Opis urządzeń Przydatność (odpowiedniość) urządzeń Urządzenia nowe Utrzymanie ruchu (konserwacja)	<b>6.3 Infrastruktura</b> Organizacja powinna określić, zapewnić i utrzymać infrastrukturę potrzebną do osiągnięcia zgodności z wymaganiami dotyczącymi wyrobu a) zabudowania, przestrzeń do pracy i związane z nią instalacje b) wyposażenie procesu (zarówno sprzęt, jak i oprogramowanie) c) usługi pomocnicze (takie jak transport lub łączność)

Powyższe przykłady (a można by je mnożyć) dobitnie ilustrują uniwersalność norm dotyczących zarządzania jakością i równocześnie uzasadniają przydatność i konieczność stosowania norm odnoszących się do określonego działu technik, w rozpatrywanym przypadku spawalnictwa, oraz metod kontroli i badań. W działaniach tych nie mogą być pominięte także wymagania obowiązujące w określonym sektorze gospodarki, dla którego wykonywane są wyroby – np. gazownictwa, kolejnictwa, maszyn i urządzeń dźwigowych czy zbiorników ciśnieniowych. Dopiero tak skompletowane informacje, po skonfrontowaniu z wymaganiami instytucji sprawujących nadzór nad danym typem wyrobów czy usług, pozwalają ustalić poziom wymagań jakościowych i zakres działań w ramach systemu zarządzania jakością.

## 2.2. Co nowego wnoszą normy serii PN-EN 729

Do czasu wprowadzenia serii norm PN-EN 729 uważano, że wytwórca stosujący także techniki spawalnicze, który spełnia wymagania normy z serii ISO 9000, jest również w pełni przygotowany do zapewnienia jakości wyrobom spawanym. W rzeczywistości nie zawsze było to uzasadnione przekonanie.

Dokument ten jest niezbędny jako przewodnik do takiego zorganizowania wszelkich działań dotyczących spawalnictwa, aby spełniały one ogólne zasady wymagane przez normy serii ISO 9000, ale równocześnie uwzględniały specyfikę procesów spawalniczych.

Zasadniczym celem wprowadzenia norm serii PN-EN 729 było umożliwienie klientom uzyskania informacji o poziomie danego wytwórcy i jego potencjalnej zdolności do wykonywania procesów spawalniczych, co pozwala na nabranie odpowiedniego stopnia

zaufania do wytwórcy. Informacja o stosowaniu normy PN-EN 729 ułatwia również prace związane z zawarciem umowy, ponieważ nie jest konieczne formułowanie wszystkich szczegółowych wymagań, a jedynie określenie poziomu wymagań dotyczących jakości w spawalnictwie.

Certyfikat potwierdzający stosowanie systemu ISO 9000 przez danego wytwórcę konstrukcji i wyrobów spawanych powinien zawierać także zapis o spełnianiu określonego poziomu wymagań normy PN-EN 729.

Stosowanie wymogów omawianej normy wiąże się ze spełnieniem wielu dodatkowych wymagań zawartych w normach powołanych, m. in. odnośnie szkolenia i kwalifikowania personelu – spawaczy, zgrzewaczy, operatorów sprzętu do zmechanizowanych metod spajania, osób wykonujących operacje obróbki cieplnej, personelu badań nieniszczących czy personelu nadzoru spawalniczego. Wymagania te są wprawdzie ujednolicone i ujęte w normach, jednakże z uwagi na specyfikę każdego sektora przemysłowego muszą ją także uwzględniać i być akceptowane przez instytucję do tego uprawnioną.

Spełnianie przez danego wytwórcę określonego poziomu wymagań dotyczących jakości w spawalnictwie nie pociąga za sobą konieczności udokumentowania tego faktu odrębnym certyfikatem.

Normy serii PN-EN 729 można stosować zarówno w przypadku, gdy wytwórca posiada wdrożony system zapewnienia jakości wg ISO 9000, jak i w przypadku niestosowania systemu ISO 9000.

Mimo, iż seria norm PN-EN 729 dotyczy przede wszystkim spawania łukowego metalowych materiałów konstrukcyjnych, to wiele zawartych w tej serii norm wymogów może być odniesionych także do innych procesów spawalniczych.

### 3. PODSUMOWANIE

Porównując wymagania zawarte w serii norm PN-EN 729 z wymaganiami norm serii PN-EN ISO 9000 łatwo można zauważyć ogólną pełną zgodność i takie samo podejście do zagadnienia zarządzania jakością. W obu zestawach porównywanych norm występują te same elementy systemu zapewnienia jakości. Zasadnicza różnica polega na tym, że normy ISO 9000 mają charakter ogólny interdyscyplinarny, zaś normy serii PN-EN 729 precyzują dokładnie wymagania dotyczące wszystkich etapów przygotowania i wykonywania operacji i czynności związanych z wytwarzaniem wyrobów spawanych.

Analizowane normy oparte są zatem na podejściu procesowym, przy czym normy serii PN-EN 729:1997 uwzględniają specyfikę i charakter grupy procesów spawalniczych.

Należy wyraźnie podkreślić, że seria norm PN-EN 729 nie stanowi norm systemów zapewnienia jakości w spawalnictwie i nie zastępuje norm serii ISO 9000, lecz jest dodatkowym specjalistycznym dokumentem rozwijającym wymagania zawarte w serii norm ISO 9000, przeznaczonym dla wytwórców stosujących procesy spawalnicze.

Na podstawie przedstawionych analiz można stwierdzić, że wymagania zawarte w normie PN-EN 729-2 w punktach: 4, 8, 11 i 14 do 17 wprost pokrywają się z wymaganiami norm ISO 9000. Oczywiście i w tych punktach wprowadzone są pewne dodatkowe akcenty uwzględniające charakterystyczne cechy produkcji spawalniczej.

Pozostałe punkty omawianej normy, tj.: 5 do 7, 9 i 10 oraz 12 i 13 dotyczą wyłącznie typowych zagadnień występujących tylko w procesach spawalniczych. Główny nacisk wymagań położony został na takie zaplanowanie i przeprowadzenie procesów spawalniczych, aby można było uważać, że uwzględnione zostały możliwie wszystkie aspekty pozwalające zaplanować oczekiwaną jakość oraz sterować jakością wyrobów.

Równoległe z wymaganiami technicznymi znalazły się precyzyjnie sformułowane wymagania dotyczące kwalifikacji personelu biorącego udział w procesie wytwarzania (bezpośredni wykonawcy: spawacze, operatorzy spawalniczych urządzeń zmechanizowanych), personelu nadzoru (koordynatorzy spawalniczy) i personelu wykonującego badania i oceny jakości.

Warto zaznaczyć, że w ostatnich czterech latach od ustanowienia polskiej wersji językowej serii norm europejskich PN-EN 729:1997 bardzo wiele organizacji gospodarczych, w działalności których techniki spawalnicze zajmują dominujące miejsce, dostosowało swe schematy organizacyjne i sposoby prowadzenia prac spawalniczych do wymogów przedstawionych norm. Szereg z tych jednostek gospodarczych uzyskało już potwierdzenie w postaci certyfikatu o spełnianiu wymogów normy z serii PN-EN 729; chociaż posiadanie takiego certyfikatu nie jest obowiązkowe, to niewątpliwie zwiększa zaufanie klientów i stanowi dobry punkt startu do szerokiej kooperacji na rynkach krajowym i zagranicznych.

## LITERATURA

- [1] Zając A.: Zarządzanie jakością. T. II, rozdział 6. Wyd. PK, Kraków 2000.
- [2] Zając A.: Zarządzanie jakością. T. IV, rozdział 4. Wyd. PK, Kraków 2000.
- [3] Zając A.: Zarządzanie jakością. T. V, rozdział 9. Wyd. PK, Kraków 2000.
- [4] Klimpel A.: Kontrola i zapewnienie jakości w spawalnictwie. T. I. Wyd. Pol. Śląskiej, Gliwice 1998.
- [5] Polski Komitet Normalizacyjny – Zbiór Polskich Norm – 2001.

## PROCESS QUALITY MANAGEMENT FOR PRODUCT AND WELDED CONSTRUCTION MANUFACTURING

### Summary

The study analyses changes in the third issue of PN ISO 9000:2001 Standards and attempts at relating the standards to product and welded construction manufacturing, which fully justifies evaluations and certifications provided by product and welded construction manufacturers compliant with PN-EN 729:1997 Standards and qualifying and issuing certificates for welding supervision and hands-on personnel as well as for research personnel for European standards compliance. Examples were given to show similarities between ISO 9000 Standards and European standards for welding quality.



## **ZGRZEWANIE ELEKTRYCZNE SZYN KOLEJOWYCH – OGRANICZENIA I MOŻLIWOŚCI TECHNICZNE**

Andrzej Zając

Politechnika Krakowska, Zakład Spawalnictwa  
Instytutu Materiałoznawstwa i Technologii Metali  
al. Jana Pawła II nr 37, 31-864 Kraków

Przedstawiono ograniczenia wynikające ze składu chemicznego stali szynowych, przekroju i profilu szyn. Scharakteryzowano proces zgrzewania doczołowego szyn. Podano przykłady wyposażenia technicznego stosowanego do zgrzewania szyn w kraju i zagranicą i na tej podstawie oceniono możliwości techniczne polskich kolei.

### **1. WPROWADZENIE**

Zasadniczym elementem nowoczesnej nawierzchni kolejowej jest tor bezстыkowy, który stanowi dowolna ilość szyn trwale i nierozłącznie połączonych ze sobą.

Jazda po torze bezстыkowym jest spokojna i cicha, nie występują uderzenia kół na uginających się stykach szyn powodujące uszkodzenia i nadmierne zużycie końców szyn i obręczy pojazdów szynowych, co często ma miejsce w przypadku toru łączonego przy pomocy łubek skręcanych śrubami. Tym samym tor bezстыkowy stwarza mniej ograniczeń eksploatacyjnych, a jazda jest bezpieczniejsza i bardziej komfortowa.

Wyeliminowanie tradycyjnego łączenia odcinków szyn przy pomocy łubek skręcanych śrubami stało się możliwe dzięki zastosowaniu spawalniczych metod łączenia szyn, a zwłaszcza zgrzewania elektrycznego i spawania termitowego.

Wprawdzie metody te są znane od prawie 100 lat, jednakże wykorzystywanie ich w skali wielkoseryjnej do łączenia tak odpowiedzialnych i trudnych technologicznie elementów jak szyny kolejowe liczy dopiero kilkadziesiąt lat.

Warunkiem uzyskania dobrych rezultatów jest jednak takie opanowanie technologii spajania złączy szyn oraz dysponowanie odpowiednimi urządzeniami, aby właściwości złączy jak najmniej odbiegały od właściwości szyn i, co bardzo ważne, były powtarzalne dla wszystkich styków.

### **2. MOŻLIWOŚCI I OGRANICZENIA TECHNOLOGICZNE DOTYCZĄCE SPAJANIA SZYN METODAMI SPAWALNICZYMI**

Szyny kolejowe jako elementy mające być poddane spajaniu metodami spawalniczymi stwarzają szereg trudności technicznych oraz technologicznych i z tego względu ilość spawalniczych metod łączenia możliwych do seryjnego wykorzystania jest znacznie ograniczona. W praktyce sprowadza się do dwu metod:

- elektrycznego zgrzewania doczołowego iskrowego,
- spawania termitowego.

Oczywiście istnieją możliwości łączenia szyn metodą spawania gazowego lub spawania łukowego ręczną elektrodami otulonymi czy spawania półautomatycznego w osłonach gazów ochronnych, ale metody te wykorzystywane są doraźnie, z reguły w warunkach awaryjnych, w celu wykonania złączy tymczasowych.

Nowa wysokoenergetyczna metoda spawania drutami proszkowymi samoosłonowymi T.I.M.E. pozostaje jeszcze w fazie prób i nie jest dopuszczona do stosowania przez większość kolei.

Ograniczenia oraz trudności techniczne i technologiczne spajania szyn metodami spawalniczymi wynikają głównie z następujących powodów:

- ⇒ składu chemicznego stali stosowanych do wytwarzania szyn,
- ⇒ wielkości przekroju poprzecznego i profilu szyn,
- ⇒ wysokich wymagań stawianych złączom spajanych łączącym szyny,
- ⇒ wymagania dużej powtarzalności parametrów procesu spajania, gwarantującej powtarzalność właściwości złączy.

Stale szynowe ze spawalniczego punktu widzenia zalicza się do materiałów trudno-spawalnych metodami spawania łukowego z powodu dość wysokiej zawartości węgla i podwyższonej zawartości manganu. Skład chemiczny stali szynowych nie utrudnia zgrzewania doczołowego iskrowego, jak również spawania termitowego. Wynika to z charakteru nagrzewania materiału szyn podczas łączenia, niskiego gradientu temperatury szyn w pobliżu miejsca styku oraz stanu łączonych powierzchni.

Także złożony i o zróżnicowanych grubościach profil przekroju poprzecznego szyn jest czynnikiem utrudniającym ich spawanie, z powodu powstawania bardzo niekorzystnego rozkładu ciepła wprowadzonego do materiału szyny podczas spawania klasycznymi metodami łukowymi lub spawania gazowego. W wyniku tego tworzy się bardzo szeroka strefa wpływu ciepła w sąsiedztwie spoiny, posiadająca niekorzystnie zmienioną strukturę i w konsekwencji tego – niekorzystne właściwości mechaniczne, zwłaszcza wskaźniki plastyczności, takie jak wydłużenie i udurowienie oraz twardość.

Ponadto z uwagi na wielkoseryjny charakter operacji łączenia szyn stosowana technologia powinna zapewniać powtarzalność właściwości złączy przez stabilne utrzymywanie parametrów procesu, co można osiągnąć przez maksymalne zmechanizowanie lub zautomatyzowanie urządzeń technologicznych lub inny sposób wyeliminowania wpływu indywidualnego wykonawcy.

Dodatkowym uwarunkowaniem przy wyborze metody spajania jest wielkość i kształt nadlewów na złączu i możliwość łatwego ich usunięcia celem doprowadzenia obszaru łączenia do profilu szyn.

Ze względu na obszerność tematyki spajania szyn w niniejszym artykule poruszone zostały jedynie wybrane zagadnienia dotyczące zgrzewania doczołowego.

### 3. ZGRZEWANIE DOCZOŁOWE ISKROWE SZYN

Jak wiadomo, zasada zgrzewania doczołowego iskrowego polega na nagraniu określonych odcinków szyn w obszarze styku do temperatury uplastycznienia materiału i następnie spęczeniu plastycznego materiału, dzięki czemu uzyskuje się złącze zgrzewane.

### 3.1. Analiza procesu technologicznego

W praktyce proces technologiczny wykonania zgrzewanego styku szyn obejmuje następujące główne operacje:

- ⇒ wizualne sprawdzenie końców szyn,
- ⇒ czyszczenie powierzchni czołowych szyn i powierzchni styku szyn z elektrodami zgrzewarki,
- ⇒ ustawienie i zamocowanie szyn między zaciskami i elektrodami zgrzewarki,
- ⇒ przeprowadzenie automatycznego procesu zgrzewania przy określonych parametrach – rysunek 1,
- ⇒ obcięcie wyływki ze złącza,
- ⇒ obróbkę cieplną złącza,
- ⇒ szlifowanie wykańczające złącza,
- ⇒ sprawdzenie prostoliniowości szyn i ewentualne prostowanie,
- ⇒ kontrolę jakości złącza,
- ⇒ sporządzenie wymaganej dokumentacji.

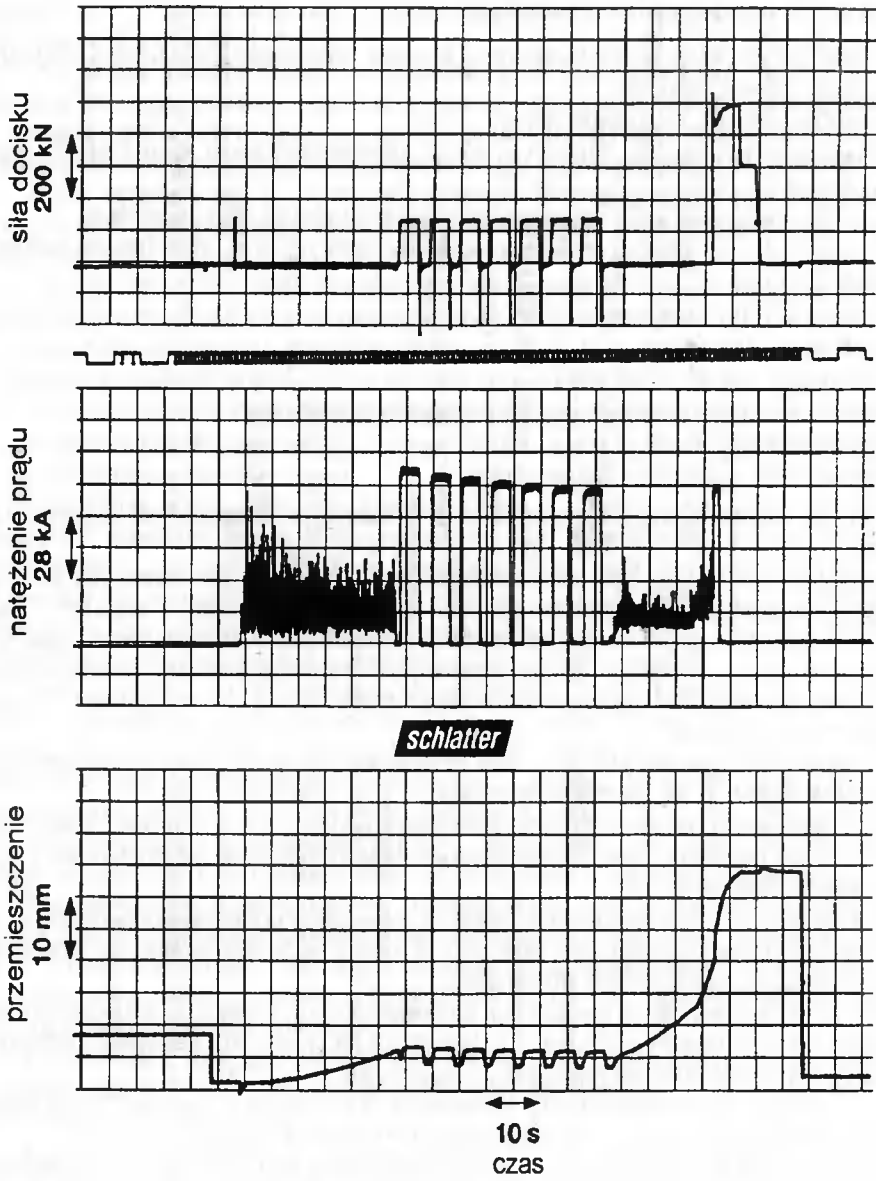
Proces automatycznego zgrzewania szyn składa się z następujących etapów – rysunek 2:

- ⇒ podgrzewanie wstępne dociśniętych niewielką siłą powierzchni czołowych końców szyn. Nagrzewanie w tym etapie odbywa się w sposób mieszany – częściowo oporowo, częściowo przez powstawanie ciekłych mostków, w których metal ulega silnemu nagrzananiu, parowaniu i częściowemu wyrzucaniu na zewnątrz. Na skutek tego procesu powierzchnie czołowe szyn zostają oczyszczone, a obszar szyn wokół styku podgrzany wstępnie,
- ⇒ podgrzewanie przez wyiskrzanie – jest to zasadniczy etap nagrzewania zgrzewanych elementów. Wyróżnić można tu dwie fazy:
  - podgrzewanie impulsowe – prąd zgrzewania podawany jest w postaci kilku - kilkunastu impulsów, które można zaprogramować stosownie do gatunku stali szynowej i typu szyn;
  - nagrzewanie przez wyiskrzanie ciągle ze wzrastającą prędkością przy określonym natężeniu prądu zgrzewania; parametry te można także zaprogramować stosownie do gatunku stali szynowej i typu szyn;
- ⇒ spęczanie, polegające na dociśnięciu zgrzewanych szyn; początkowo proces ten odbywa się przy przepływie prądu i z dużą prędkością dosuwu, następnie kontynuowany jest bez prądu z malejącą prędkością dosuwu.

Zaprogramowane parametry zgrzewania zadawane są urządzeniu przez układ sterowania i rejestrowane podczas przebiegu procesu zgrzewania.

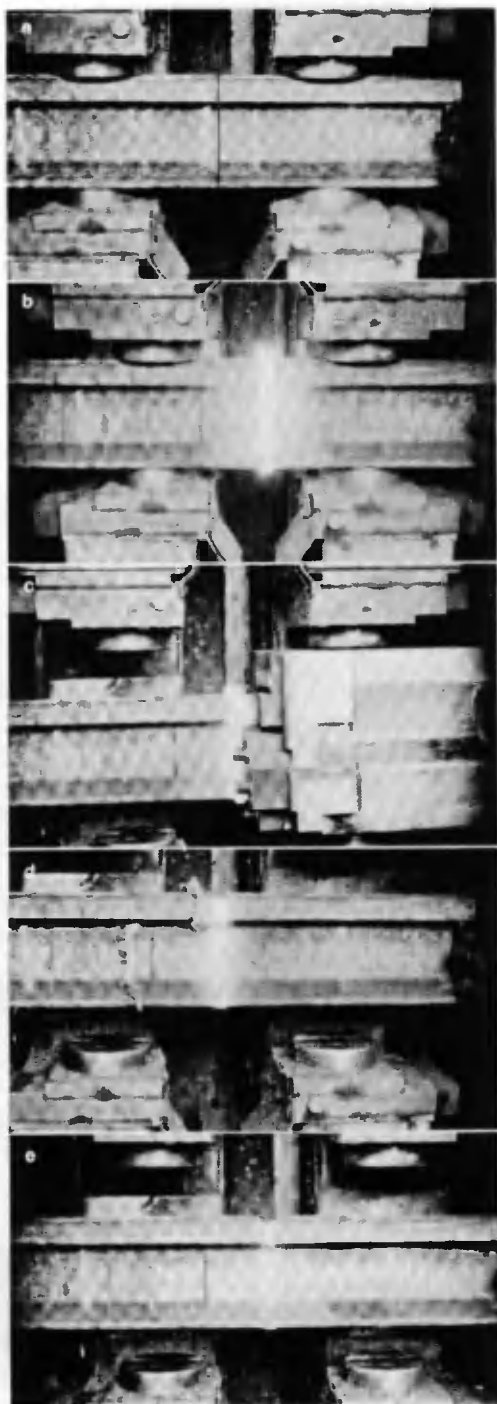
Przykład zapisu parametrów zgrzewania podano na rysunku 1, a na rysunku 3 pokazano typowy wygląd złącza bezpośrednio po zgrzewaniu, z nie obciętą wyływką,

- ⇒ obcinanie wyływki ze złącza – odbywa się również na zgrzewarce; do tego celu służy komplet noży złożony z 4 elementów, przy czym równocześnie pracują po 2 noże - rysunek 4 i rysunek 5,
- ⇒ obróbka cieplna złączy, która może być przeprowadzana także bezpośrednio na zgrzewarce; parametry procesu obróbki cieplnej mogą być również zaprogramowane i realizowane automatycznie.

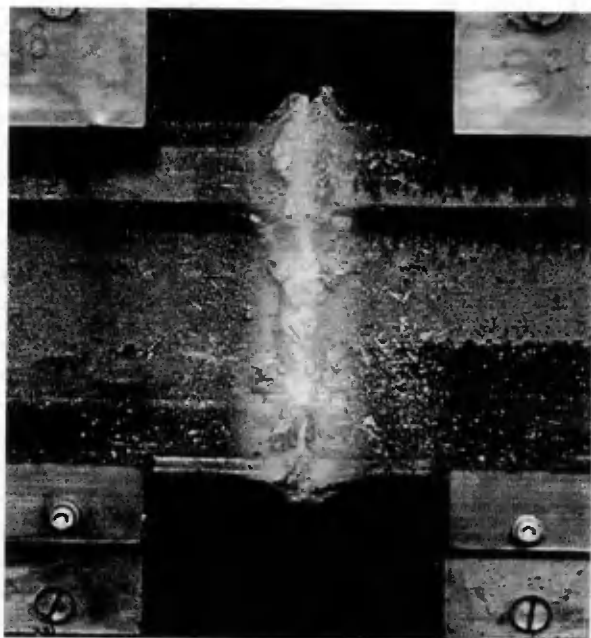


Rys. 1. Cykl zgrzewania szyn kolejowych

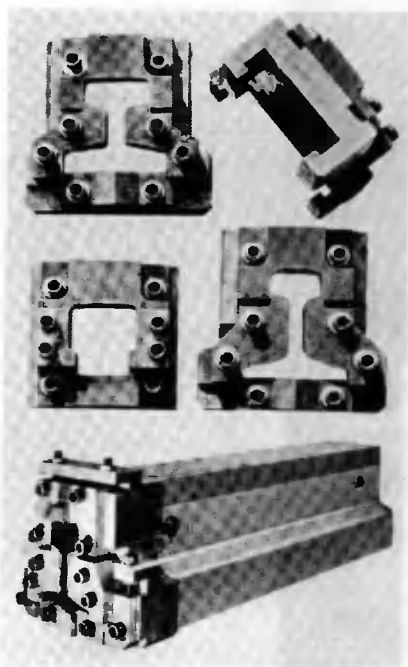




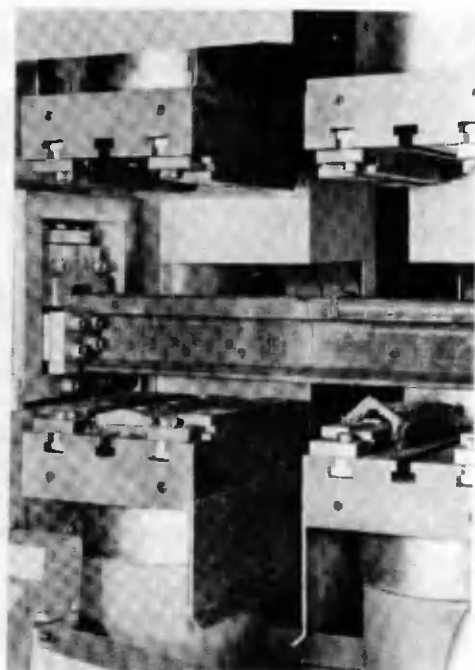
Rys. 2. Etapy tworzenia złącza zgrzewanego [1]



Rys. 3. Wygląd gorącej zgrzeiny bezpośrednio po zakończeniu zgrzewania [2]



Rys. 4. Zespół noży zgrzewarki Schlatter do obcinania wypłytki [1]

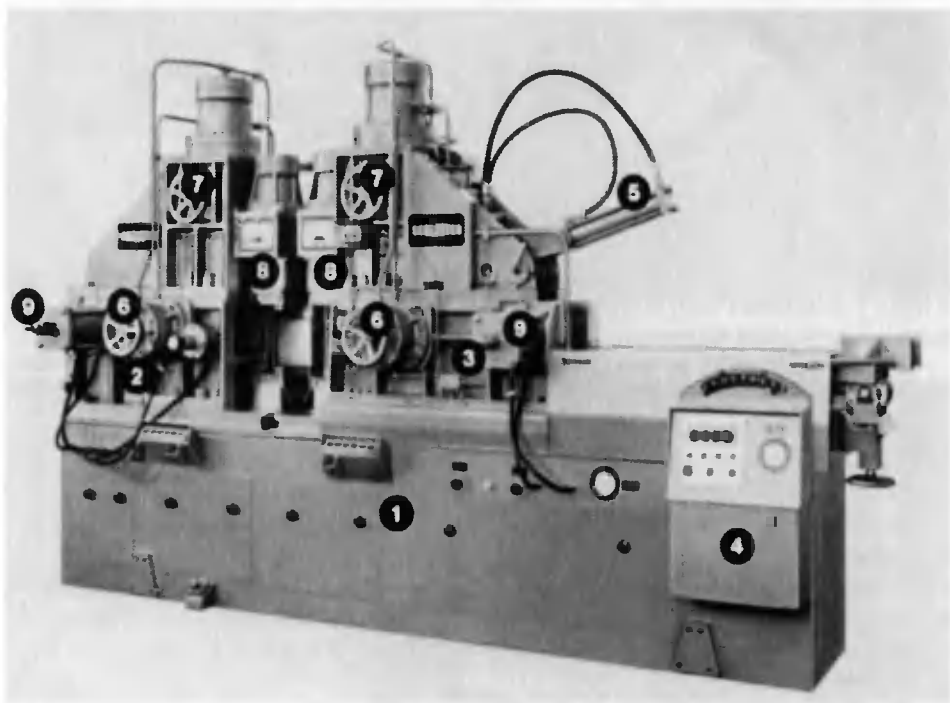


Rys. 5. Obcinanie wypłytki na zgrzewarce Schlatter [1]

### 3.2. Urządzenia do zgrzewania szyn

Potrzeby PKP w zakresie prefabrykacji kilkuset metrowych odcinków szyn do budowy torów bezстыkowych zaspokajają 3 zgrzewalnie stacjonarne, działające w ramach zakładów utrzymania ruchu kolei PKP PLK S.A. zlokalizowanych w Bydgoszczy, Kędzierzynie-Koźlu i Skarżysku-Kamiennej. Zgrzewalnie te wyposażone są w specjalizowane zgrzewarki doczołowe do szyn firmy szwajcarskiej SCHLATTER, wchodzącej obecnie w skład korporacji RAILTECH SCHLATTER Systems.

Wygląd klasycznej zgrzewarki firmy szwajcarskiej SCHLATTER z lat 60, pokazano na rysunku. 6. Zgrzewarki tego typu eksploatowane były w Polsce do lat 90.

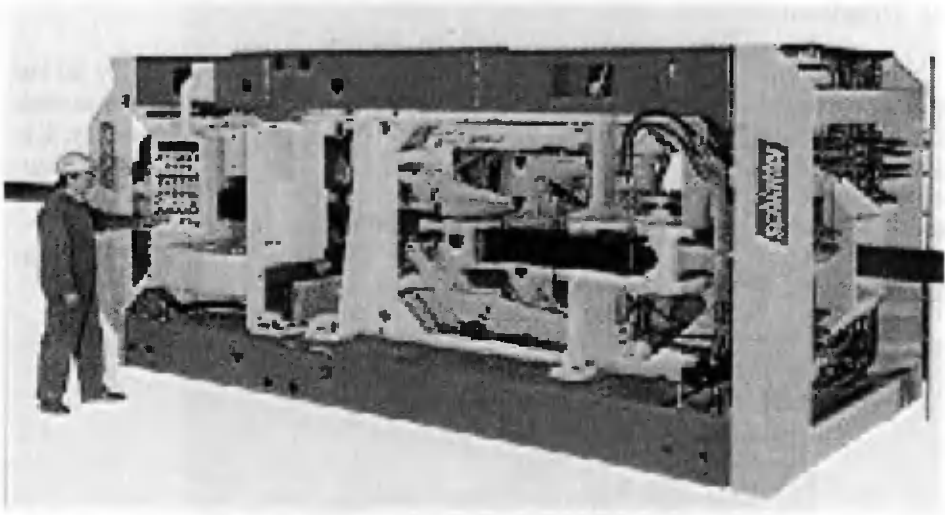


Rys. 6. Stacjonarna zgrzewarka Schlatter typu Aa 50/600 u [1]

Z początkiem lat 90. w ramach kredytów pomocowych wszystkie krajowe zgrzewalnie szyn zostały zmodernizowane i wyposażone w najnowocześniejsze zgrzewarki firmy SCHLATTER typu Gaas-760 oraz niezbędne maszyny, a to: szlifierki typu MAS 130 do szlifowania główki szyny produkcji firmy Geismar oraz prościarki zgrzein typu APZT-140 produkcji Zakładu Maszyn Torowych w Krakowie.

Wygląd zgrzewarki stacjonarnej nowej generacji produkcji korporacji RAILTECH SCHLATTER Systems przedstawia rysunek 7.

Zgrzewalnia szyn w Bydgoszczy posiada poszerzony zakres działania o reprofilację szyn. Z tego względu oprócz wymienionego wyposażenia w zgrzewalni tej dodatkowo zainstalowana jest grupa maszyn i urządzeń do reprofilacji szyn starych, które zgrzewane są tak jak szyny nowe.



Rys. 7. Stacjonarna zgrzewarka Railtech Schlatter typu GAAS-80 [3]

Krajowe zgrzewalnie szyn wykonują z reguły tzw. szyny długie o długości 210 mb, na które w przypadku szyn nowych składa się 7 szyn krótkich, tj. o długości 30 mb, połączonych sześcioma zgrzeinami.

Należy podkreślić, że wszystkie zgrzewalnie krajowe w pełni opanowały proces zgrzewania szyn, a wydajność zgrzewania kształtuje się na poziomie od 840 do 1060 mb szyn długich na jedną zmianę na jednej linii produkcyjnej.

Powtarzalna wysoka jakość złączy zgrzewanych pozwala dopuszczać prędkość pociągów do 160 km/godz., a nawet do 250 km/godz. [4].

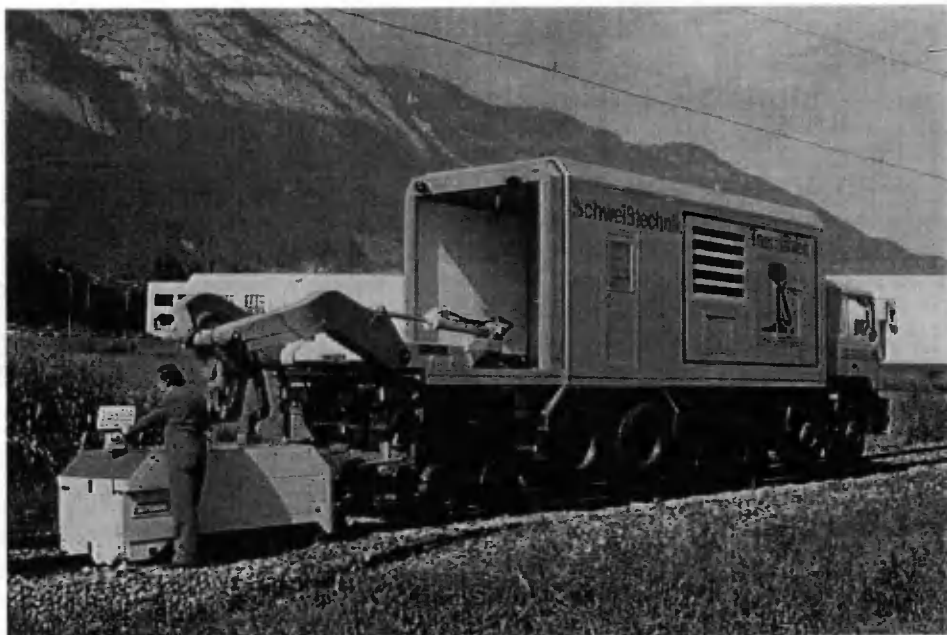
Powyższe zalety procesu zgrzewania szyn i perfekcyjne rozwiązania konstrukcyjne zgrzewarek produkcji korporacji RAILTECH SCHLATTER Systems doprowadziły do zbudowania gamy zgrzewarek przejezdnych. Mogą one być montowanych na pojazdach drogowych wyposażonych dodatkowo w kolejowe wózki podwoziowe – typu Supra-Roadflex – rysunek 8 i rysunek 9, lub na specjalnych pojazdach kolejowych – typu Supra-Railflex – rysunek 10 i rysunek 11.

Zgrzewarki te przystosowane są do pracy bezpośrednio na szlaku kolejowym, wyposażone są we własne źródła zasilania i podobnie jak zgrzewarki stacjonarne pracują w programowalnym cyklu automatycznym. Przykład schematu układu kompensacji siły docisku zgrzewarki typu Supra-Railflex przedstawiono na rysunku 12.

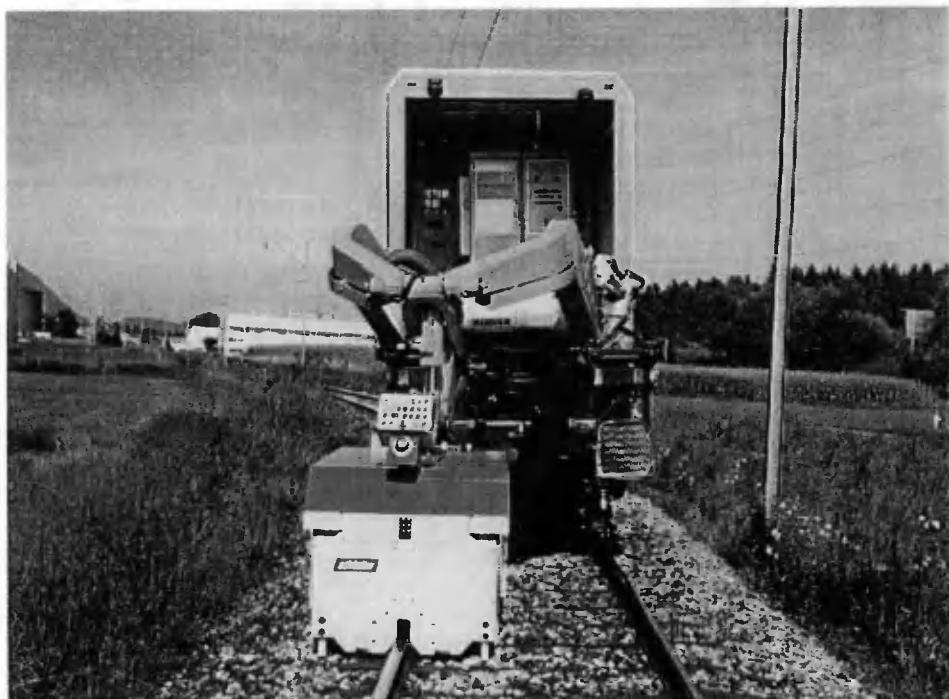
Niestety PKP PLK S.A. nie posiada jeszcze tego typu wyposażenia.

Do prac na szlaku kolejowym zakłady utrzymania ruchu kolei PKP PLK S.A. dysponują ponad 40 zestawami przejezdnych zgrzewarek doczołowych iskrowych produkcji Kachowskich Zakładów Aparatury Spawalniczej w Kachowce wg projektu Instytutu Spawania Elektrycznego im. E.O. Patona Narodowej Akademii Nauk Ukrainy w Kijowie. Jest to całkowicie odmienna konstrukcja zgrzewarki doczołowej podwieszanej, samojezdnej – na pojeździe kolejowym, automatycznej, z nożem obcinającym wypływkę ze wszystkich powierzchni szyny i także z własnym zasilaniem.

Rysunki 13 do 16 przedstawiają powyższe urządzenie i kolejne fazy zgrzewania.



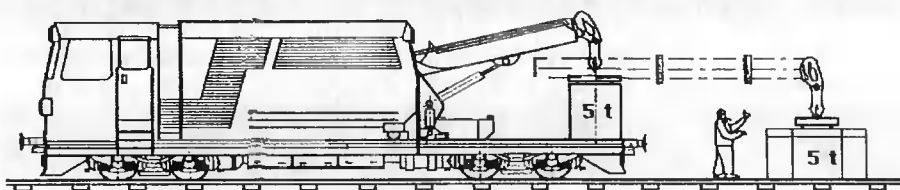
Rys. 8. Przejazdna zgrzewarka Railtech Schlatter typu Supra-Roadflex [3]



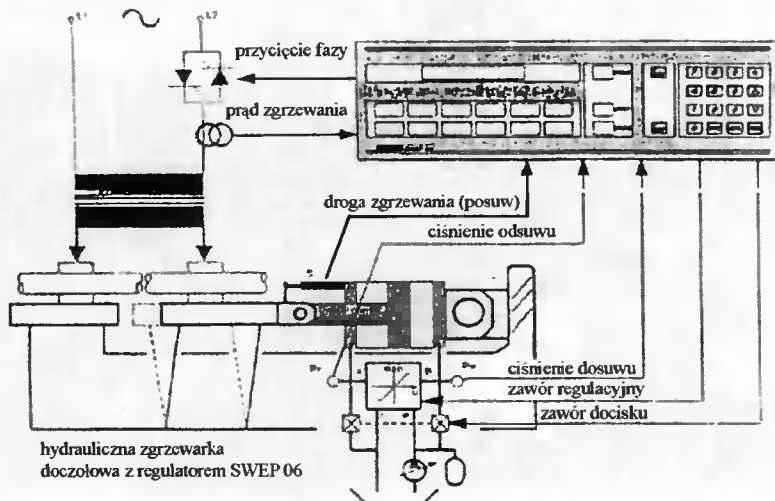
Rys. 9. Przejazdna zgrzewarka Railtech Schlatter typu Supra-Roadflex [3]



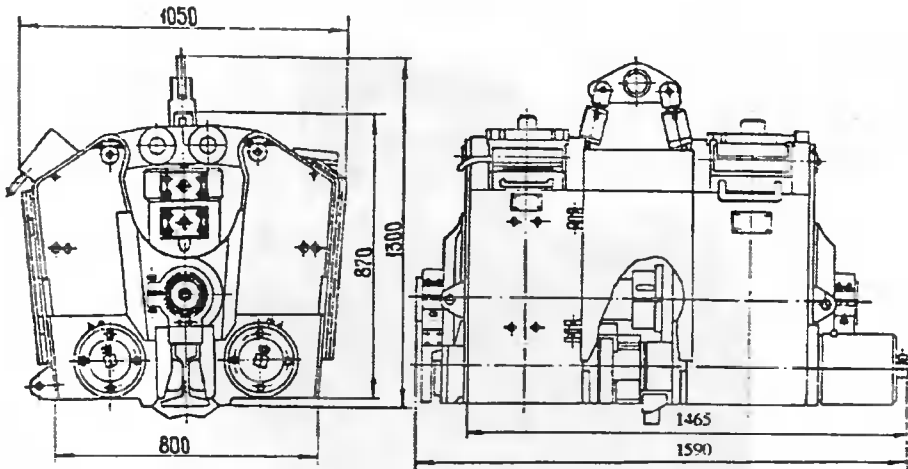
Rys. 10. Przejezdna zgrzewarka Railtech Schlatter typu Supra-Railflex [3]



Rys. 11. Przejezdna zgrzewarka Railtech Schlatter typu Supra-Railflex [2]



Rys. 12. Schemat układu kompensacji siły docisku zgrzewarki typu Supra-Railflex [3]



Rys. 13. Głowica typu K 900 zgrzewarki przejazdnej typu PRSM prod. b. ZSRR [5]



Rys. 14. Ustawianie głowicy typu K 900 zgrzewarki przejazdnej typu PRSM [6]



Rys. 15. Zgrzewanie głowicą typu K 900 zgrzewarki przejazdnej typu PRSM [6]



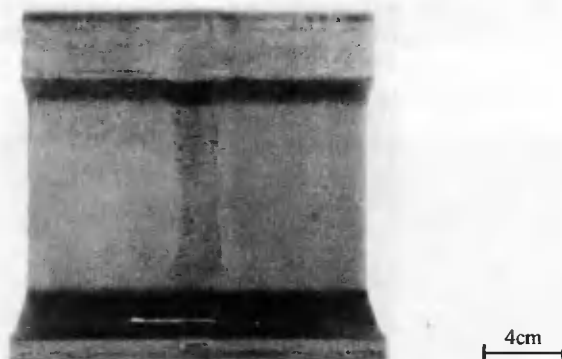
Rys. 16. Nóż do obcinania wypływki zgrzeiny typu ARBENT 12 produkcji firmy ARBENT Kraków [7]



### 3.3. Własne badania metaloznawcze złączy zgrzewanych szyn typu UIC 60

Badania przeprowadzono na złączach zgrzewanych pobranych losowo z bieżącej produkcji Zgrzewalni Szyn [8].

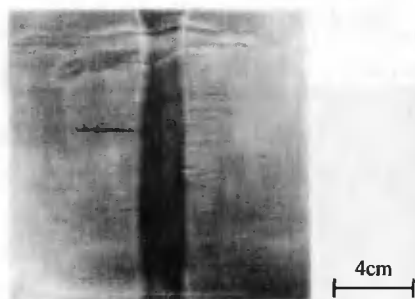
Stwierdzono, że wygląd złączy jest poprawny. Szyny zostały zgrzane w prawidłowym ustawieniu, zachowana została prostoliniowość, profile szyn pokrywają się na całym przekroju. Na rysunku 17 pokazano typowy wygląd badanych złączy.



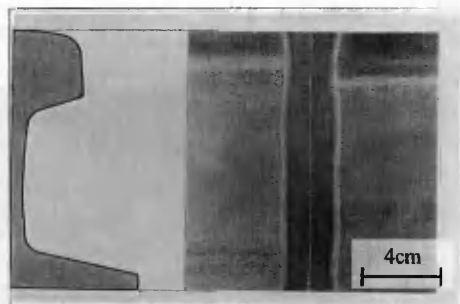
Rys. 17. Typowy wygląd złącza zgrzewanego z obciętymi wypływkami

Złącza oceniano w stanie nieszlifowanym celem określenia jakości i dokładności obcinania wypływki na zgrzewarce. Stwierdzono, że wypływka zgrzeiny została obcięta na wszystkich powierzchniach szyn. Pozostający naddatek na główce szyny nie przekraczał 1 mm.

Badania makroskopowe przeprowadzono na przekrojach wzdłużnych obejmujących całe złącze i odcinki przylegającego do niego materiału szyn. Wykonano trawienie odczynnikami Adlera celem uzyskania obrazu linii zgrzania i obszaru strefy wpływu ciepła złącza oraz odbitki Baumanna celem ujawnienia rozłożenia siarki. Trawienie wykonane odczynnikami Adlera ujawniło obszar złącza zgrzewanego i przebieg linii zgrzania, co pokazano na rysunku 18.



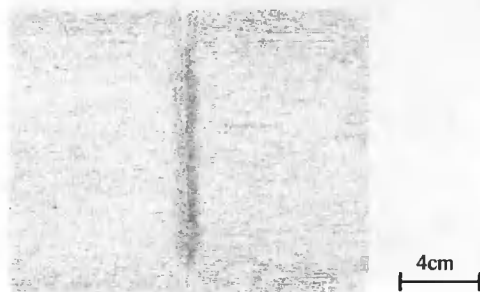
Rys. 18. Widok strefy złącza w przekroju wzdłużnym, traw. odczynnikami Adlera



Rys. 19. Widok strefy złącza w przekroju wzdłużnym [3], traw. odczynnikami Adlera

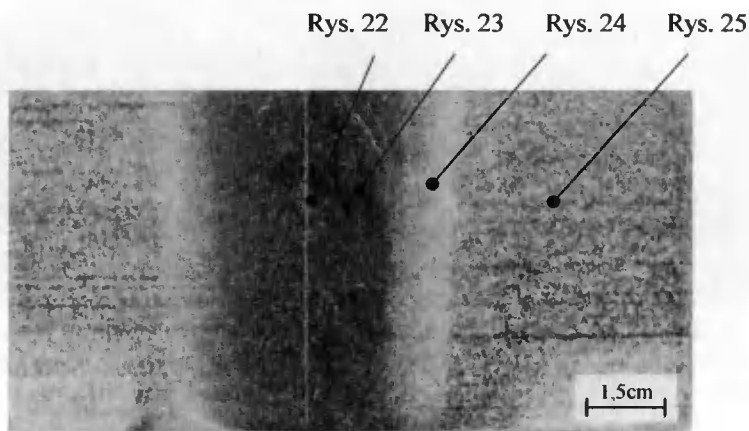
Jak widać, linia zgrzania przebiega prostopadłe do osi wzdłużnej szyn i jest linią ciągłą. Obszar strefy wypływu ciepła jest symetryczny po obu stronach linii zgrzania, jego szerokość wynosi łącznie około 80 mm. W linii zgrzania nie stwierdzono braku ciągłości metalicznej. Dla porównania na rysunku 19 zamieszczono obraz linii zgrzania i obszaru strefy wpływu ciepła z [3].

Rozłożenie siarki w złączy ilustruje odbitka Baumanna zamieszczona na rysunku 20. Rozkład siarki jest równomierny, charakterystyczny dla wyrobów walcowanych typu szyna. W linii zgrzania obserwuje się większe niż w materiale skupienie siarki, co też jest typowe dla złączy zgrzewanych i związane jest ze spęczaniem zgrzewanych elementów.

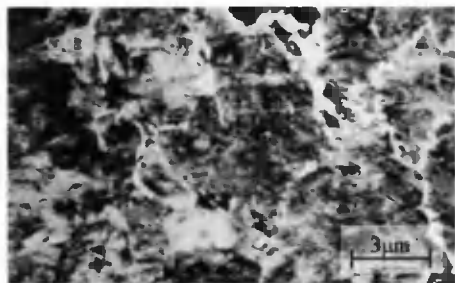


Rys. 20. Odbitka Baumanna ze strefy złącza w przekroju wzdłużnym

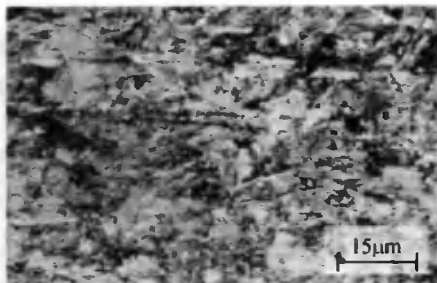
Cykl cieplny zgrzewania prowadzi do nagrzania powierzchni czołowych końców szyn do temperatury topnienia, a w bezpośrednio przylegającym obszarze materiału do temperatury przekraczającej temperaturę początku przemiany austenitycznej. Odprowadzanie ciepła przez materiał szyny powoduje jej nagrzanie na dalej położonym odcinku. Odpowiednio do zakresu osiągniętych przez dany odcinek szyny temperatur i czasu pozostawania w tej temperaturze następują charakterystyczne zmiany strukturalne stali szynowej. Na rysunku 21 pokazano fragment strefy zgrzania z obszaru główki z zaznaczonymi miejscami, w których wykonano zdjęcia występujących w tych miejscach struktur. Struktury te przedstawiono na rysunkach od 22 do 25.



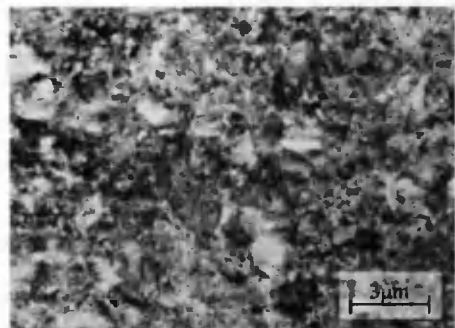
Rys. 21. Fragment strefy zgrzania z obszaru główki, traw. odczynnikiem Adlera



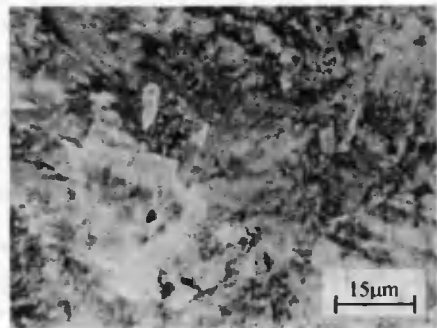
Rys. 22. Struktura materiału w linii zgrzania, traw. azotalem



Rys. 23. Struktura materiału w strefie wpływu ciepła; traw. azotalem



Rys. 24. Struktura materiału w strefie wpływu ciepła, traw. azotalem

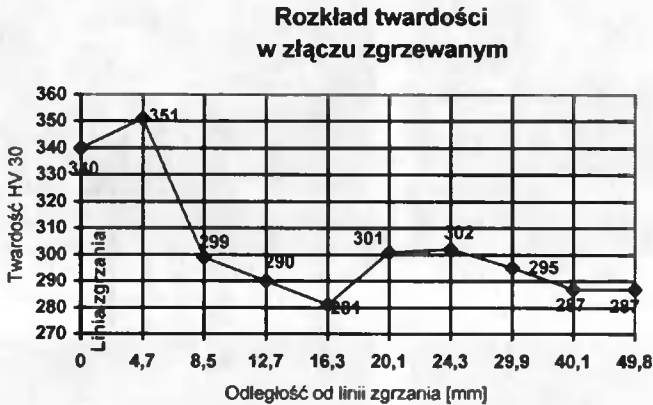


Rys. 25. Struktura materiału poza strefą wpływu ciepła, traw. azotalem

Obserwacje mikroskopowe struktury materiału w linii zgrzania ujawniły występowanie w tym obszarze wydzieleni ferrytu częściowo w układzie Widmannstättena, jak to widać na rysunku 22. W strefie wpływu ciepła w pobliżu linii zgrzania występuje perlit płatkowy z nielicznymi wydzieleniami ferrytu po granicach ziarn, co pokazano na rysunku 23. W bardziej odległym od linii zgrzania miejscu strefy wpływu ciepła stwierdzono występowanie częściowo skoagulowanego perlitu, jak to widać na rysunku 24. Poza strefą zgrzania obserwuje się strukturę perlityczną – rysunek 25.

Jak widać zmiany struktury materiału mają charakter ciągły i łagodny. Nie stwierdzono niekorzystnych skokowych zmian struktury, które mogłyby stanowić karb strukturalny. Obserwacje te potwierdza również ciągły charakter niewielkich zmian twardości.

Pomiary twardości w złączach zgrzewanych przeprowadzono metodą Vickersa przy obciążeniu 297 N (30 kG) na próbkach pobranych z główek zgrzewanych szyn. Rozmieszczenie punktów pomiarowych i uzyskane wyniki przedstawiono na rysunku 26.



Rys. 26. Wyniki pomiarów twardości w obszarze strefy zgrzania

#### 4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

1. Zgrzewanie doczołowe iskrowe jest procesem w wystarczającym stopniu poznanym teoretycznie i opanowanym technicznie.
2. Powszechne stosowanie zgrzewania doczołowego iskrowego do łączenia szyn jest od szeregu lat możliwe dzięki opracowaniu specjalizowanych, automatycznych zgrzewarek i towarzyszących urządzeń technologicznych.
3. Krajowe zaplecze budowy i utrzymania ruchu kolei pracujące dla potrzeb PKP PLK S.A. dysponuje odpowiednim wyposażeniem technicznym na poziomie światowym oraz posiada wieloletnie doświadczenie.
4. Zgrzewanie doczołowe iskrowe szyn, mimo zasygnalizowanych ograniczeń, pozwala uzyskiwać złącza, których SWC nie stanowi karbu strukturalnego obniżającego ich właściwości.
5. Warunkiem uzyskania poprawnego złącza zgrzewanego jest ścisłe przestrzeganie technologii procesu zgrzewania i utrzymywanie wszystkich urządzeń technologicznych w pełnej sprawności.
6. Istotną zaletą tej metody łączenia szyn jest maksymalne wyeliminowanie chwilowej dyspozycji oraz indywidualnych umiejętności manualnych pracowników bezpośrednio realizujących proces zgrzewania, a także możliwość ograniczenia badań kontrolnych i odbiorczych do niezbędnego minimum dzięki ciągłemu monitorowaniu procesu i rejestracji parametrów.
7. Codzienna praktyka krajowych zgrzewalni szyn oraz uzyskane wyniki badań potwierdzają, że złącza szyn zgrzewane doczołowo iskrowo stanowią pełnowartościowy odcinek szyn i nie obniżają właściwości użytkowych toru kolejowego. Potwierdzeniem tego wniosku jest fakt, że 2/3 złączy torów bezстыkowych na sieci PKP PLK S.A. wykonanych jest metodą zgrzewania.
8. Reasumując należy stwierdzić, że postęp w rozwoju technologii spawalniczych i przygotowanie zakładów zaplecza budowy i utrzymania ruchu kolei pracujących dla potrzeb PKP PLK S.A. są w zupełności wystarczające do spełnienia ostrych warunków odbioru złączy szyn na tory bezстыkowe.

## LITERATURA

- [1] Neukom A.: Das Abbrenn-Stumpfschweissen von Eisenbahnschienen. Schlatter Bulletin 10, 4-25.
- [2] Materiały informacyjne firmy ESAB – Szwecja, 1996.
- [3] Materiały informacyjne firmy RAILTECH SCHLATTER SYSTEMS – Francja, 1995.
- [4] Brodacki K., Janik A.: Porównanie procesów technologicznych zgrzewania szyny długiej. Materiały I Ogólnopolskiej Konferencji Naukowo-Technicznej „Spawalnictwo dróg szynowych i sposoby diagnozowania”, Częstochowa – Kule, grudzień 2001, 31-42.
- [5] Materiały informacyjne firmy E.O. Paton International Holdings Inc. – Ukraina, 1996.
- [6] Fotografie ze zbiorów PKP Ośrodka Diagnostyki i Spawalnictwa Nawierzchni Kolejowej w Warszawie, 1999.
- [7] Materiały informacyjne firmy ARBENT – Kraków, 2000.
- [8] Wielgosz R., Zajac A.: Badania połączeń szyn kolejowych zgrzewanych doczołowo iskrowo i spawanych termitowo. Politechnika Krakowska, Kraków 2000.

## ELECTRIC WELDING OF RAILS – LIMITS AND POTENTIAL

## Summary

The paper discusses electric welding of rail limits due to chemical rail composition, rail section and profile as well as rail butt-welding. Sampled technical equipment for rail welding used at home and abroad is presented to show a potential of Polish railways.



## **UWAGI O APLIKACJI TECHNIK SPAWALNICZYCH W KOLEJNICTWIE W ASPEKTCIE ANALIZY WYMIAROWEJ PROCESU – PODSTAWY TEORETYCZNE**

Eugeniusz Ranatowski

Katedra Inżynierii Materiałowej  
Akademia Techniczno-Rolnicza w Bydgoszczy  
Al. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz

W pierwszej kolejności dokonano merytorycznej oceny normy DIN 6700 część 1÷6 ze szczególnym uwzględnieniem zastosowanej metodologii naukowo-badawczej oraz ustaleń technicznych. W dalszej części przedstawiono podstawowe pojęcia i opis procesu wymiarowania i podobieństwa modelu i rzeczywistej konstrukcji.

### **1. WSTĘP**

Jakość konstrukcji spawanych zasadniczo kształtuje się na etapie technicznego przygotowania produkcji i połączona jest z całą infrastrukturą techniczną i produkcyjną. Z uwagi na duży udział konstrukcji spawanych w kolejnictwie, a więc w budowie pojazdów szynowych oraz łączeniu szyn, rozjazdów itd., decyduje w dużej mierze o warunkach bezpieczeństwa ich użytkowania. Niewłaściwa ich jakość może być w czasie eksploatacji przyczyną awarii nawet o katastroficznym charakterze oraz zagrożeniem życia ludzkiego. W związku z tym od wielu lat w państwach uprzemysłowionych istnieją przepisy prawne, które zobowiązują producenta do poddania się dozorowi przez specjalnie do tego powołane instytucje. Konkretnym przykładem mogą być np. normy DIN serii 6700 część 1÷6, sprzężone w kilku punktach z EN. Obejmują one główne elementy procesu tworzenia finalnej jakości wyrobów – pojazdów szynowych. Rozważmy więc w dalszej kolejności zakres ich ingerencji w proces produkcyjny z naukowego punktu widzenia.

### **2. SYNTETYCZNA CHARAKTERYSTYKA USTALEŃ NORMY DIN 67000 CZĘŚĆ 1÷6**

Ogólna tematyka normy DIN serii 6700 część 1÷6 wraz z modyfikacją z 2001 roku dotyczy spawania pojazdów i elementów pojazdów szynowych. Zawierają one wymagania i ustalenia dotyczące aplikacji technik spawalniczych w budowie pojazdów szynowych. Norma składa się z 6. części o następującej tematyce [1]:

- część 1 – pojęcia podstawowe, wymagania podstawowe;
- część 2 – kwalifikacja zakładów, zapewnienie jakości;
- część 3 – dane konstrukcyjne;
- część 4 – zasady wykonania;
- część 5 – wymagania jakościowe;
- część 6 – materiały, dodatki spawalnicze i spawalnicze dokumenty techniczno-technologiczne.

Z powyższego zestawienia wynika jednoznacznie objęcie całej przestrzeni naukowo-technicznej (n-t) związanej z realizacją prac spawalniczych przy budowie pojazdów szynowych.

W celu jednakowego rozumienia i uporządkowania tej przestrzeni wykonano w części 1 normy semantyczną analizę pojęć, obejmujących cały zakres czynności związany z produkcją i naprawą pojazdów szynowych wraz z przywołaniem odpowiednich aktów normatywnych wg DIN oraz DIN-EN. Zasadę tę stosuje się również w pozostałych częściach 2÷6 normy.

W części 2 przedstawiono podstawowe czynności kwalifikowania zakładów spawających pojazdy szynowe z uwzględnieniem wymagań konstrukcyjnych – klasy C1÷C5, zasadach ich uwzględniania poprzez procedury kwalifikacyjne wykonawcy oraz spawanych elementów, zgodnie z załącznikami A-H. Należy podkreślić, iż procedury związane z badaniem połączeń spajanych – spawanych oraz zgrzewanych bazują na klasycznych, ogólnie uznanych i stosowanych metodach badawczych: nieniszczących – np. rtg, ultradźwiękowych, niszczących – np. na statyczne rozciąganie, zginanie oraz badaniach struktury i mają charakter eksperymentalny, a sama procedura wskazuje na ustalenia oparte o klasyczne rozwiązania mechaniki ośrodków ciągłych.

Część 3 zawiera wymagania stawiane spawanym konstrukcjom pojazdów szynowych jako rezultatu norm bazowych wg DIN i DIN-EN. W pierwszej kolejności ustalono ogólne zasady konstrukcyjne. Dotyczą one sposobu rozmieszczania spoin oraz zawierają szczegółowe wytyczne rozwiązywania samych połączeń i węzłów spawanych oraz zgrzewanych wraz z podaniem zaleczanych rozwiązań.

Część 4 określa, w pierwszej kolejności, ogólne zasady wykonawcze przy produkcji i naprawach pojazdów szynowych, a następnie podaje ustalenia uwarunkowane rodzajem spawanego materiału. Dla stali niestopowych i staliwa warunki spawania określa się w oparciu o równoważnik węgla CEV oraz grubość blachy. Po przekroczeniu wartości  $CEV \geq 0,30$  zaleca się wstępne podgrzewanie oraz kontrolę energii liniowej spawania oraz uwzględnienie wykresów CTP. Należy stwierdzić, że jest to procedura pozwalająca tylko na przybliżone określenie i opanowanie negatywnych zjawisk mogących prowadzić np. do pęknięć w spoinie lub SWC. Świadczy o tym chociażby podanie dopuszczalnych krytycznych twardości w SWC, wynoszące dla stali konstrukcyjnych  $HV = 350$  wg DIN 6700-6A oraz dla staliwa i pozostałych stali 150% twardości materiału podstawowego. Dla stali wysokostopowych powyższe procedury uzupełnia się również diagramem Schöfflera w celu doboru materiałów dodatkowych. Przed rozpoczęciem produkcji pojazdów szynowych zaleca się przeprowadzenie prób roboczych wg DIN EN 288-8.

Część 5 poświęcona jest wymaganiom jakościowym złączy spawanych i zgrzewanych pojazdów szynowych, gdzie określone są klasy jakości spoin dla różnych procesów spawalniczych oraz wymagań jakościowych wg DIN EN 25817 lub DIN EN 30042. Analiza ww. dokumentów i zestawień zawartych w części 5 normy wyraźnie wskazuje na fenomenologiczny charakter powyższych ustaleń.



Część 6 obejmuje bardzo istotne informacje, dotyczące stosowanych materiałów podstawowych oraz dodatkowych materiałów spawalniczych, metod spawania oraz dokumentacji techniczno-technologicznej. Dobór materiałów dokonuje się zgodnie z odpowiednimi normami DIN lub EN oraz analizowaną normą, zgodnie z zasadą, że muszą to być *materiały o udowodnionej spawalności*. Spawalność jest *udowodniona*, gdy materiały odpowiadają normom materiałowym DIN lub EN, w których są określane jako spawalne, lub gdy uzyska się dowód spawalności poprzez badanie metody spawania wg DIN EN 288-3 lub DIN EN 288-4. Do prac spawalniczych można stosować tylko metody dopuszczone wg DIN 6700-6B oraz te, które stosuje zakwalifikowany zakład wg DIN 6700-2. Również w tym przypadku, z uwagi na sposób przyjętych ustaleń jako kwalifikacji materiałów o udowodnionej spawalności i ich realizacji w stosunku do dopuszczalnych metod spawania, należy przyjąć, iż ma on charakter empiryczny, oparty na niewątpliwie dużym doświadczeniu. Nie zmienia to jednak faktu, że prowadzi to ostatecznie do bardzo kosztownych eksperymentów i braku pewności co do ostatecznych ustaleń naukowo-technicznych. Świadczą o tym chociażby aktualnie prowadzone prace przez CEN TC 256 nad projektem normalizacyjnym „Spawanie pojazdów szynowych i ich elementów”.

Należy równocześnie stwierdzić, iż przywoływane standardowe normy wg EN, np. EN 288 „Wymagania dotyczące technologii spawania metali i jej uznawanie”, narzucają rozszerzenie zakresu stosowanych dotychczas badań technologii, opartych o badania defektoskopowo-wytrzymałościowo-metalograficzne.

Stosunkowo nowe ustalenia niemieckiego Ministerstwa Nauki i Technologii wydają się zaprzeczać tej tendencji [2]. W wyżej wspomnianych ustaleniach stwierdza się, że 75% wad produktów powstaje na etapie projektowania, konstruowania oraz opracowania technologicznego dokumentacji technicznej.

Tak więc kryteria jakościowe kierują działania naukowo-techniczne na modernizację i nowe jakościowo podejście na etapie technicznego przygotowania produkcji. W powyższym aspekcie jakość wyrobu, w tym także spawanego, powstaje w pierwszej kolejności na etapie technicznego opracowania konstrukcji i technologii, obejmującego całą infrastrukturę techniczną i produkcyjną oraz kwalifikacje personelu spawalniczego. Istotnym elementem ww. procesu jest również jakość użytych materiałów, których cechy mechaniczne, użyteczność technologiczna i własności eksploatacyjne są także brane pod uwagę na etapie projektowania. W związku z powyższym konieczna jest zupełnie nowa strategia działań naukowo-technicznych i organizacyjnych, których celem jest [3]:

- osiągnięcie własności eksploatacyjnych wyrobów w małym stopniu uzależnionych od charakterystyki użytych materiałów,
- ustalenie technologii mało wrażliwych na odchylenia parametrów w toku produkcji,
- produkcja wyrobów odpornych na zmiany warunków eksploatacyjnych,
- optymalizacja działań inżynierskich.

Jednym ze środków umożliwiających realizację tak postawionych celów przez inżynierię jakości i stosowne dokumenty ISO, EN i PN-EN oraz inne normy zagraniczne, np. DIN-EN jest konieczność odejścia od powierzchniowych opracowań konstrukcyjnych i technologicznych oraz oparcie ich o możliwie szerokie ustalenia, które wynikają ze znajomości procesów wyteżenia materiałów oraz fizyki procesów technologicznych spawania i wynikającej z tego analizy wymiarowej ww. procesów.

### 3. UWAGI O WYMIAROWANIU I PODOBIENSTWIE MODELU ORAZ UKŁADU RZECZYWISTEGO

Jedynym przeznaczeniem przestrzeni wymiarowej jest opis rzeczywistości materialnej. Jawne wysunięcie idei o wymiarze fizycznym jest zasługą Jean Baptiste Fouriera. W zakresie nauk technicznych – budowy i eksploatacji maszyn, cechą wspólną klasycznych metod wymiarowania jest oparcie się na hipotezach wytrzymałościowych i założenie, że materiał, z którego została wykonana konstrukcja jest idealnym ośrodkiem ciągłym (continuum materialne), zaś odpowiedni warunek wytrzymałościowy jest oparty na liniowej teorii sprężystości. W pierwszej kolejności wyznacza się stan naprężenia i odkształcenia, a następnie obszary, gdzie osiągają one wartości ekstremalne. Może to spowodować powstanie w takich obszarach odkształcenia trwałego o wielkości uznanej za niebezpieczną lub nawet pęknięcia. W powyższym kontekście mówimy o miejscu największego wyężenia materiału, mając na myśli funkcję, której wartość liczbową jest miarą zbyt wielkich odkształceń trwałych lub pęknięcia. Należy jednakże podkreślić, iż klasyczne hipotezy wyężeniowe, np. Hubera-Misesa (H-M) oraz ich modyfikacje uwzględniające, oprócz drugich niezmienników dewiatora naprężeń, pozostałe niezmienniki tensorowe naprężeń lub traktujące w inny sposób zjawisko pęknięcia np. hipoteza Dawidenkowa-Fridmana lub Pełczyńskiego, pomijają szereg ważnych aspektów dotyczących rzeczywistych warunków wyężenia materiału. Można tu przykładowo wymienić:

- nie uwzględnia się tzw. efektu skali, pomijając cechy geometryczne konstrukcji,
- pomija się stan struktury materiału, jego heterogeniczność, wewnętrzne nieciągłości oraz wady powstałe np. w procesie wytwarzania konstrukcji lub w czasie eksploatacji,
- nie rozpatruje się samego przebiegu procesu zniszczenia,
- operuje się pojęciami, które zostały zbudowane dla modelu continuum.

Ponadto należy stwierdzić, iż sam fakt obecności nieciągłości typu szczelina w materiale oznaczałby – w oparciu o hipotezy wyężeniowe np. Hubera-Misesa – przekroczenie wartości wyężenia materiału. Wynika to z faktu, iż naprężenia w otoczeniu wierzchołków szczeliny w ramach liniowej teorii sprężystości na ogół wzrastają nieograniczenie, niezależnie od wartości przyłożonych sił zewnętrznych [4].

W związku z powyższym koniecznością staje się przyjęcie bardziej złożonych modeli aniżeli klasyczny model „continuum materialnego” poprzez wprowadzenie dodatkowych postulatów, znalezienia wartości obciążeń krytycznych, przekroczenie których powoduje rozprzestrzenianie się szczelin. Należy stwierdzić, iż problem ten w równym stopniu odnosi się do oceny wyężenia materiałów poddanych procesowi technologicznemu, związanemu np. z nadawaniem stosownych kształtów i wymiarów elementowi konstrukcyjnemu i gotowym wytworom. Dotyczy to zwłaszcza obróbki plastycznej lub spajania, podczas których materiał doznaje znacznego wyężenia. Ponadto zagadnienie to obejmuje złożoną problematykę inżynierii materiałowej, dotyczącą projektowania nowych materiałów konstrukcyjnych, struktury materiału i stosownej relacji struktura – własności mechaniczne. Dotyczy to w równym stopniu podobnych problemów w procesach spajania metali i stopów, np. spawania i zgrzewania, lutowania, a więc i zagadnień dotyczących aplikacji technik spawalniczych w kolejnictwie. Pełniejsze rozpoznanie tych zagadnień sprzyja ustaleniu optymalnych cech struktury i własności mechanicznych, a także, przy poprawnym rozpoznaniu i opisie problemów fizycznych zachodzących w czasie realizacji procesów technologicznych umożliwia wprowadzenie elementów optymalizacyjnych, pozwalających spełnić postulaty inżynierii jakości.

W powyższym aspekcie wydaje się, że istotnym elementem uzupełniającym klasyczne sposoby wymiarowania materiałów i konstrukcji może być mechanika pękania, poprzez wprowadzenie nowych parametrów i kryteriów oceny wyężenia materiału uwzględniających obecności wad, np. mikro- lub makropęknięć oraz innych niespełnionych postulatów procesu poprawnego wymiarowania.

Wobec powyższego rozważmy w dalszej kolejności główne zasady wymiarowania i podobieństwa z formalnego punktu widzenia.

Proces konstruowania jakiegokolwiek wytworu możemy uznać za stworzenie pewnej modelowej sytuacji wytworu, która w dalszej kolejności przybierze kształt realnej konstrukcji – układu rzeczywistego. W związku z powyższym przyjęcie i ustalenie właściwych relacji pomiędzy wymiarami stosowanymi przy budowie modelu a rzeczywistą konstrukcją należy uznać za pierwszy element poprawności procesu wymiarowania i stworzenia właściwej przestrzeni wymiarowej. Przestrzeń wymiarowa jest odzwierciedleniem matematycznego opisu modelu, wyróżniającą jego fizykalną strukturę i najbardziej istotne cechy. Według Polańskiego [5] model matematyczny obiektu badań materiałów (konstrukcji) oznacza odzwierciedlenie związków między czynnikami mającymi wpływ na budowę strukturalną i funkcjonowanie obiektu badań wyrażone w kategoriach matematycznych.

Poprawny proces modelowania wymaga użycia właściwych, w sensie podobieństwa, modeli i warunków. Warunkiem koniecznym i dostatecznym występowania podobieństwa między modelem rzeczywistym a obiektem jest opisanie zachodzących w nich procesów za pomocą:

- identycznych równań różniczkowych,
- zgodności kryteriów podobieństwa.

Mierzalnym wielkościom fizycznym przypisuje się wymiary fizyczne. Skalarne wielkości fizyczne są elementami przestrzeni skalarów wymiarowych  $D$ . Przyjmuje się zwykle reguły mnożenia i podnoszenia do potęgi rzeczywistej. W  $D$  można wskazać szczególnie podzbiór elementów zwanych wzorcami  $W$ . Skończony zespół wzorców  $W_1, \dots, W_n$  stanowi układ jednostek w  $D$ , jeżeli dowolny element  $A$  z  $D$  daje się jednoznacznie przedstawić w formie [6, 7]:

$$A = a W_1^{a^1} \dots W_n^{a^n} \quad (1)$$

gdzie:

$a, a^1, \dots, a^n$  - układ liczb rzeczywistych.

Każdy podzbiór  $\Omega \subset D$  składający się ze wszystkich  $A$  o ustalonych wykładnikach  $(a^1, \dots, a^n)$  nazywa się wymiarem. Wymiar  $\Omega$  składa się z podzbioru  $\Omega_+$  określonego przez warunek  $a > 0$ , podzbioru  $\Omega_-$ , dla którego  $a < 0$  i swego zera wymiarowego. Podobieństwo  $\tau$  względem układu jednostek  $W_1, \dots, W_n$  jest jednoznacznie określone przez zespół współczynników podobieństwa  $(\tau_1, \dots, \tau_n)$ . Na przykład grupa podobieństw przestrzeni  $D$  mechaniki klasycznej działa w przestrzeni tensorów naprężeń zgodnie z regułą [7]:

$$\sigma \rightarrow \tau \cdot \sigma = (\tau_M \cdot \tau_L^{-1} \tau_T^{-2}) \sigma \quad (2)$$

gdzie:

- M - masa, g,
- L - wymiar geometryczny, cm,
- T - czas, s.

Kryteria i niezmienniki podobieństwa są liczbami bezwymiarowymi i otrzymujemy je w wyniku przekształcenia metodą podobieństwa modelu matematycznego procesu lub zjawiska fizycznego. Jeżeli  $i$ -tą zmienną w układzie rzeczywistym oznaczymy przez  $x_i$ , a w układzie modelowym symbolem  $\bar{x}_i$ , to dla obu układów zachodzą związki [8]:

$$\frac{x_1}{\bar{x}_1} = c_1, \dots, \frac{x_i}{\bar{x}_i} = c_i, \dots, \frac{x_n}{\bar{x}_n} = c_n \quad (3)$$

gdzie:

- $c_i$  - skala modelowania.

Skala modelowania, będąca w swojej istocie czynnikiem transformującym, jest dla każdej zmiennej stała, lecz dla różnych zmiennych może posiadać różną wartość. Jeżeli do ogólnej formy równania zjawiska fizycznego  $D(x_1, \dots, x_n)$  wprowadzimy wielkości  $\bar{x}_i$ , to zachodzi relacja:

$$D(x_1, x_2, \dots, x_n) = D(c_1 \bar{x}_1, c_2 \bar{x}_2, \dots, c_n \bar{x}_n) \quad (4)$$

Dla zjawisk fizycznych podobnych zachodzi związek:

$$D(x_1, x_2, \dots, x_n) = D(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n) \quad (5)$$

Zależność (5) jest spełniona, jeżeli czynniki transformacyjne spełniają warunek:

$$\psi(c_1, c_2, \dots, c_n) = 1$$

gdzie:

$$\psi(c_1, c_2, \dots, c_n) = \frac{D(c_1 \bar{x}_1, c_2 \bar{x}_2, \dots, c_n \bar{x}_n)}{D(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n)} \quad (6)$$

Dla ciał geometrycznie podobnych, np. model – konstrukcja, oznacza to możliwość przekształcenia jednego w drugie za pomocą jedynokładności:

$$\frac{x_1}{\bar{x}_1} = \frac{x_2}{\bar{x}_2} = \frac{x_3}{\bar{x}_3} = c \quad (7)$$

gdzie:  $x_1, x_2, x_3$  i  $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3$  są odpowiednio wymiarami obiektu rzeczywistego – konstrukcji i modelu przy zachowaniu podobieństwa zjawisk, które obejmuje również warunki brzegowe.

Wobec tego podstawowe prawo podobieństwa oznacza jednakowy stopień odkształcenia modelu i obiektu rzeczywistego:

$$\frac{\varepsilon}{\bar{\varepsilon}} = \frac{\Delta x}{x} \cdot \frac{\bar{x}}{\Delta \bar{x}} = c \cdot \frac{1}{c} = 1 \quad (8)$$

$$\bar{\varepsilon} = \varepsilon \quad (9)$$

Podobieństwo zjawisk w procesie odkształcania obejmuje również:

- jednakowe własności materiału modelu i obiektu rzeczywistego przed i w czasie odkształcania,
- jednakowy czas trwania odkształcania modelu i obiektu rzeczywistego, ponieważ  $\dot{\varepsilon} = d\varepsilon / dt$ , więc stopień odkształcania powinien być również jednakowy,
- jednakową temperaturę modelu i obiektu rzeczywistego podczas odkształcania; warunek ten jest zachowany w procesie izotermicznym i adiabatycznym, a dla innych procesów zależy od warunków odprowadzania ciepła.

Spełnienie ww. warunków, a zwłaszcza pierwszego i ostatniego, nastęrcza praktycznie duże trudności. W odniesieniu do oceny skutków procesów termicznych spajania obowiązuje również zasada podobieństwa. Teoria podobieństwa jest w rzeczywistości w swojej strukturze matematycznej teorią symetrii (niezmienności). Każde przeskalowanie w układzie model – obiekt rzeczywisty (konstrukcja) realizowane przez podobieństwo mechaniczne będzie prowadzić do poprawnej nowej sytuacji i jest ono główną treścią pracy wielu ośrodków naukowych, prowadzących do uproszczenia i obniżenia kosztów badań laboratoryjnych wielkogabarytowych konstrukcji.

Jest więc rzeczą oczywistą, iż przyjęcie modelu „continuum materialnego” jako podstawy do oceny wytrzymałości rzeczywistej konstrukcji, w której w formie jawnej występują nieciągłości o wymiarach mikro- lub makroskopowych musi prowadzić do zawężenia przestrzeni wymiarowej, niezbędnej do poprawnego opisu zjawisk z fizycznego punktu widzenia.

Zasadniczo, zgodnie z serią norm DIN-6700, analiza wymiarowa procesu spawania i jego skutków opiera się na parametrach adekwatnych do modelu „continuum materialnego”. Dodatkowo spełnienie wytycznych wg norm serii ISO 9000 oraz EN 729 wymaga więc rozszerzenia analizy wymiarowej procesu, zarówno na etapie konstruowania, jak i ustalania dokumentacji technologicznej i procesów kontrolnych.

Istotnym uzupełnieniem wymiarów stosowanych w mechanice kontinuum, takich jak energia =  $L^2MT^{-2}$ , gęstość =  $L^{-3}M$ , naprężenie =  $FL^{-2} = LMT^{-2}$ , prędkość  $LT^{-1}$ , przyspieszenie  $LT^{-2}$ , siła  $F = LMT^{-2}$ , długość =  $L$ , są nowe wymiary, wynikające z mechaniki pęknięcia. Do najważniejszych i najczęściej używanych należą: współczynnik intensywności naprężenia  $K_{n=I,II} = FL^{-3/2} = MT^{-2}L^{-1/2}$ , rozwarcie wierzchołkowe pęknięcia  $\delta$  - CTOD =  $L$ , współczynnik uwalniania energii (strain energy release rate) lub siła wydłużająca pęknięcie (crack extension force)  $G = FL^{-1} = MT^{-2}$ , całka Rice'a - Čerepanova  $J = FL^{-1} = MT^{-2}$ . Parametry te są użyteczne na etapie konstruowania pojazdów szynowych, jak i na etapie oceny spawalności w zakresie stopnia uwrażliwienia materiału.

W przypadku oceny skutków procesu spawania, analiza wymiarowa powinna uwzględniać również zagadnienia termiczne. Algorytm generacji rozwiązania dla analizy procesu cieplnego spawania opiera się na ustaleniach fizyki procesu spawania oraz zagadnieniach pokrewnych, bazując na odpowiednim modelu procesu. Równocześnie sam zapis algorytmu może odbywać się w oparciu o źródło wiedzy podstawowej (WP)

oraz wiedzy dodatkowej (WE), opartej na badaniach eksperymentalnych. Dla analizowanego procesu cieplnego spawania, w zakresie WP wchodzą prawa fizyczne wyrażone poprzez równania Fouriera, Naviera-Stokesa, Maxwella itp., natomiast w zakresie WE wchodzą wartości parametrów opisujących model, z czym wiąże się zagadnienie identyfikacji obiektu badań. Tak więc podstawowym zadaniem, w pierwszej kolejności, jest stworzenie odpowiedniego modelu rzeczywistego obiektu (lub układu) badań.

Klasyczne rozwiązania równania różniczkowego przewodzenia ciepła prowadzące do analitycznego określenia pól temperaturowych w czasie procesu spawania zapoczątkowały głównie prace Rosenthala i Rykalina. Pola temperatur oraz parametry pokrewne w procesie spawania określono, dokonując następujących uproszczeń i założeń:

- a) analiza ograniczona jest do stanu quasi-stacjonarnego, czyli ustalonego pola temperatur,
- b) źródła ciepła mają postać: punktową, liniową lub płaską o działaniu chwilowym lub ciągłym,
- c) stałe charakteryzujące własności fizyczne materiału są niezmiennie, niezależne od temperatury,
- d) spawane ciała mają charakter izotropowy,
- e) brak jest źródeł lub upustów ciepła w czasie przemian fazowych podczas spawania,
- f) przedmiot, który poddany jest działaniu źródeł ciepła ma charakter: ciała nieskończonego, ciała masywnego ( $g > 25$  mm), płyty ( $3 < g < 25$  mm), powłoki ( $g < 3$  mm), pręta ( $F = \text{const}$ ,  $F$  – przekrój).

Należy podkreślić, iż przyjęte przez autorów założenia są daleko idącymi uproszczeniami, rzutującymi w sposób istotny na dokładność oceny temperatur oraz innych parametrów charakteryzujących cieplny cykl spawalniczy.

W pierwszej kolejności naturalne ograniczenia tkwią w samej metodyce obliczeń, opartej na metodzie czysto analitycznej, ograniczonej tylko do rozwiązań liniowych. Stosowane metody najczęściej wykorzystują metodę transformacji całkowych oraz metodę funkcji Greena. Przykładowo podstawą rozwiązań Rykalina, dla powłoki przy liniowej formie źródła ciepła jest całkowanie funkcji Greena. Dla modelu płyty i ciała masywnego zastosowano punktowy model źródła ciepła. Wpływ grubości spawanej płyty na rozkład temperatur w metodzie Rykalina i Rosenthala został w tym przypadku uwzględniony poprzez tzw. metodę źródeł, polegającą na wprowadzeniu dodatkowych, fikcyjnych źródeł ciepła. Związane jest to z uwzględnieniem ograniczonego przepływu ciepła w kierunku osi „z”, związanego z grubością elementu. Przy przyjęciu punktowego źródła ciepła, kształt spoiny i głębokość penetracji zależy tylko od mocy źródła ciepła, chociaż jak wykazuje praktyka spawalnicza, ta sama moc, lecz inne parametry określające charakterystykę źródła ciepła tworzą spoinę o różnym kształcie. Dzięki metodom czysto analitycznym uzyskano również rozwiązania dla modelu źródła ciepła o charakterze kołowo-normalnym. Przyjęte powyżej modele źródeł ciepła, w rozwiązaniach analitycznych, stwarzają w naturalny sposób ograniczenia związane z koniecznością przyjęcia adekwatnych modeli elementów spawanych, co uczyniono w klasycznych rozwiązaniach Rykalina i Rosenthala, wprowadzając modele ciała nieskończonego, półnieskończonego, płyty, powłoki i pręta. Należy podkreślić, iż przyjęte modele zarówno źródeł ciepła, jak i związane z nimi modele ciał spawanych nie są adekwatne do stosowanych obecnie metod, np. opartych na strumieniu plazmy, laserze, wiązce elektronicznej, czy nawet opartych na łuku elektrycznym w metodzie GTA, GMA czy automatycznym spawaniu łukiem krytym. Pierwszą konsekwencją obecnego stanu techniki spawalniczej jest konieczność użycia nowych modeli źródeł ciepła o charakterze prze-

strzennym, ale o różnej „smukłości” i wprowadzenia zupełnie nowej relacji w zakresie źródło ciepła – model elementu spawanego. Związane jest to z zupełnie innym przepływem ciepła w elemencie spawanym oraz odmienną charakterystyką rozkładu temperatur i parametrów pokrewnych.

Istotną wadą klasycznych rozwiązań Rykalina i Rosenthala jest również nieuwzględnienie wymiany ciepła na powierzchniach ograniczających elementy spawane. Kolejną wadą, wynikającą z naturalnych ograniczeń metody analitycznej jest identyfikowanie procesów spawalniczych w opisie fizycznym jako liniowych, chociaż natura ich opisu powinna być nieliniowa, gdyż taka jest w rzeczywistości, co możemy łatwo udowodnić, bazując na określonych w punkcie 2 zasadach modelowania. Jeżeli dla stacjonarnego układu współrzędnych  $x_0$ ,  $y_0$ ,  $z_0$ , przyjmiemy za podstawę analizy równanie różniczkowe prowadzenia ciepła w płycie w postaci:

$$\operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) - c_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} = -q_v(x_0, y_0, z_0, t) \quad (10)$$

gdzie:

- $T$  - temperatura, °C lub K,
- $t$  - czas, s,
- $\lambda$  - współczynnik przewodności cieplnej,  $\text{W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ,
- $c_p$  - ciepło właściwe,  $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ,
- $\rho$  - gęstość,  $\text{kg} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,
- $q_v$  - źródło ciepła,  $\text{W} \cdot \text{cm}^{-3}$ .

to dla klasycznych rozwiązań analitycznych wg Rykalina i Rosenthala parametry fizyczne charakteryzujące ww. model procesu są stałe, natomiast dla rzeczywistego układu spawanego są nieliniowe, co wynika z ich uzależnienia od temperatury  $T$ . Wobec powyższego charakterystyka podobieństwa wg równań (3)÷(7) wynosi:

– dla modelu procesu

$$\begin{aligned} \lambda &= \text{const} \\ c_p &= \text{const} \\ \rho &= \text{const} \end{aligned}$$

– dla układu rzeczywistego

$$\begin{aligned} \bar{\lambda}(T) &\neq \text{const} \\ \bar{c}_p(T) &\neq \text{const} \\ \bar{\rho}(T) &\neq \text{const} \end{aligned}$$

$$\frac{\lambda}{\bar{\lambda}(T)} \neq c_1, \quad \frac{c_p}{\bar{c}_p(T)} \neq c_2, \quad \frac{\rho}{\bar{\rho}(T)} \neq c_3 \quad (11)$$

$$\psi(c_1, c_2, c_3) \neq 1 \quad (12)$$

Również parametr  $q_v$  – w przypadku modelu i układu rzeczywistego – nie spełnia podobieństwa geometrycznego dla większości współczesnych metod spawania: łukowego pod topnikiem, ręcznego spawania łukowego elektrodami głęboko topiącymi metodą GTA oraz GMA, a także wysokoskoncentrowanymi źródłami ciepła (strumieniem plazmy, laserem, wiązką elektronów) przy przyjęciu punktowego, liniowego lub płaskiego modelu źródła ciepła  $\bar{q}_v$ .

Powyższe ustalenia wskazują na brak podobieństwa dla większości metod spawania pomiędzy modelem a rzeczywistym układem spawania. Stwarza to naturalne ograniczenia w ich stosowaniu we współczesnych rozwiązaniach spawalnictwa, kierując uwagę na takie rozwiązania, w których sam proces modelowania pozwala w pełniejszym stopniu spełnić podstawowe zasady i kryteria podobieństwa poprzez aplikację metod analityczno-numerycznych i numerycznych, co bliżej określono w opracowaniu [9].

#### 4. WNIOSKI

Uwzględniając fakt, iż norma DIN6700 może stanowić pewien wzór w zakresie aplikacji spawalnictwa w budowie pojazdów szynowych, można stwierdzić, iż przyjęte założenia i merytoryczna treść normy bazują głównie na ustaleniach naukowo-technicznych wynikających z badań eksperymentalnych. Stwarza to naturalne ograniczenia w ocenie skutków działań konstrukcyjnych, technologicznych oraz w procesie produkcyjnym na jakość wyrobu. Wyższą jakość tych działań można osiągnąć poprzez rozszerzenie analizy wymiarowej procesów, której istotę przedstawiono w niniejszym opracowaniu.

#### LITERATURA

- [1] Zakład Naukowo-Szkoleniowy Techniki Spawalniczej Halle GMBH, 1970: Norma Niemiecka DIN-6700.
- [2] Rahmenkonzept Qualitaessicherung, 1990: BMFT Bonn.
- [3] Myśliwiec M., 1995: Zastosowanie inżynierii jakości do oceny procesów technologicznych i wyrobów. Współczesne problemy inżynierii mechanicznej. Politechnika Gdańska.
- [4] Olesiak Z., 1988: Koncentracja naprężeń, naprężenia kontaktowe. Mechanika techniczna. Wytrzymałość elementów konstrukcyjnych. Redakcja M. Życzkowski. PWN Warszawa.
- [5] Polański Z., 1977: Metody optymalizacji w technologii maszyn. PWN Warszawa.
- [6] Rychlewski J., 1991: Wymiary i podobieństwo. PWN Warszawa.
- [7] Rychlewski J., 1991: Symetria przyczyn i skutków. PWN Warszawa.
- [8] Gabryszewski Z., Gronostajski J., 1991: Mechanika procesów obróbki plastycznej. PWN Warszawa.
- [9] Ranatowski E., Poćwiardowski A., 1998: Analityczna ocena cyklu cieplnego w procesie spawania w strefie wpływu ciepła przy wykorzystaniu różnych modeli źródeł ciepła. Zesz. Nauk. ATR w Bydgoszczy, Mechanika 42.

### COMMENTS ON THE APPLICATION OF WELDING METHODS IN RAILWAY AS A DIMENSIONING ANALYSIS; THEORETICAL BACKGROUND

#### Summary

The paper presents a substantial assessment of the German DIN 6700 Standard, part 1-6, scientific-and-research methodology and engineering considerations, in specific. Additionally basic terms are given as well as a description of dimensioning, model similarity and real structures.



## **UWAGI O APLIKACJI TECHNIK SPAWALNICZYCH W KOLEJNICTWIE W ASPEKCIE ANALIZY WYMIAROWEJ PROCESU – PRZYKŁADY ZASTOSOWAŃ**

Eugeniusz Ranatowski

Katedra Inżynierii Materiałowej  
Akademia Techniczno-Rolnicza w Bydgoszczy  
Al. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz

W pierwszej części przedstawiono możliwość zastosowania parametrów i kryteriów mechaniki pękania do rozszerzenia analizy wymiarowej procesu oceny wyteżenia materiału. Dotyczy to etapu konstruowania wytworu i oceny stopnia uwrażliwienia materiału na proces spawania. Ponadto scharakteryzowano praktyczny sposób rozszerzenia analizy wymiarowej cyklu cieplnego na etapie opracowania procesu technologicznego.

### **1. WSTĘP**

W niniejszym opracowaniu przedstawiono w sposób syntetyczny dwa przykłady rozszerzonej analizy wymiarowej procesu spawania i jego skutków, bazując na ustaleniach liniowej mechaniki pękania oraz teorii procesów cieplnych w ujęciu nieliniowym. W obydwu przypadkach wprowadzono w stosunku do klasycznych ustaleń eksperymentalnych nowe parametry, uściślające fizyczną analizę procesu spajania, co niewątpliwie pozwala określić bardziej szczegółowo procesy konstruowania wyrobów oraz technologię ich wykonania, minimalizującą koszty ustaleń technicznych.

### **2. SYNTETYCZNA CHARAKTERYSTYKA ROZSZERZENIA ANALIZY WYMIAROWEJ W OPARCIU O PARAMETRY I KRYTERIA MECHANIKI PĘKANIA**

W niniejszym opracowaniu ograniczymy się do charakterystyki parametrów i kryteriów mechaniki pękania, uzupełniających przestrzeń wymiarową opartą na liniowej teorii sprężystości. U podstaw mechaniki pękania jest koncepcja i model Griffitha, który wprowadził do modelu kontinuum nieciągłość o charakterze szczeliny o długości  $2a$ . Został on w latach 50. zmodyfikowany przez Irwina, któremu zawdzięczamy wprowadzenie do analizy wymiarowej procesu wyteżenia materiału takich parametrów jak współczynnik intensywności naprężenia  $K_n$ , współczynnik uwalniania energii  $G$  oraz współautorstwo wraz z Wellsem parametru  $\delta_c$ , określającego rozwarcie wierzchołkowe szczeliny. Zgodnie z ich interpretacją fizyczną, charakteryzują one stopień wyteżenia

materiału w obszarze przywierzchołkowym szczeliny, decydującym o rozwoju i propagacji szczeliny (pęknięcia). Nie są to jednak jeszcze kryteria inicjacji rozwoju szczeliny. Bardzo użytecznym narzędziem w mechanice pęknięcia jest również całka niezmiennicza od drogi całkowania wokół wierzchołka szczeliny  $J$ , wprowadzona przez Rice'a i Čerpanova.

Zgodnie z rozwiązaniami klasycznej mechaniki pęknięcia podstawą do analizy jest model continuum materialnego, w którym usytuowana jest szczelina. Wprowadzenie nowej zmiennej, którą jest wzrastająca długość szczeliny pod wpływem pola siłowego, prowadzi do oceny parametrów mechaniki pęknięcia  $K_n$ ,  $G_n$ ,  $J_n$ ,  $\delta_T$ . Wiążąc ww. parametry odpowiednio z odpornością na pęknięcie  $K_{nc}$ ,  $G_{nc}$ ,  $J_{nc}$ ,  $\delta_{Tc}$  tworzymy podstawowe kryteria mechaniki pęknięcia  $K_n = K_{nc}$ ,  $G_n = G_{nc}$ ,  $J_n = J_{nc}$ ,  $\delta_T = \delta_{Tc}$ . Kryteria te charakteryzują więc stopień wyężenia materiału w obszarze przywierzchołkowym szczeliny. W klasycznych rozwiązaniach liniowej i sprężysto-plastycznej mechaniki pęknięcia zakładamy, iż cechą analizowanego ośrodka materialnego jest izotropowość cech fizycznych (w tym mechanicznych), niezmiennych w czasie  $t$ . Odnosząc powyższe kryteria do oceny stopnia wyężenia złącza spawanych możemy uznać lewe strony równań i parametry  $K_n$ ,  $G_n$ ,  $J_n$ ,  $\delta_T$  jako wypadkowe czynniki konstrukcyjno-technologiczne, uzależnione od:

- rodzaju i stanu obciążenia i naprężenia,
- konfiguracji i wymiarów szczeliny,
- cech geometrycznych konstrukcji lub elementu.

Prawe strony równań, określane eksperymentalnie w warunkach laboratoryjnych, z uwagi na bezpośrednie powiązanie ich z cechami fizycznymi materiału możemy uznać za wskaźnik wrażliwości materiału na proces spawania. Badając więc różne strefy złącza spawanego – spoiny lub strefy wpływu ciepła uzyskamy kompleksową ocenę odporności złącza na pęknięcie. Powyższa koncepcja w odniesieniu do połączeń spawanych wymaga jednakże modyfikacji, z uwagi, między innymi, na znaczne odstępstwa od podstawowego modelu fizycznego, bazującego na izotropowości i niezmienności cech fizycznych materiału w czasie.

Proces spawania może prowadzić do lokalnych zmian struktury o znacznym stopniu heterogeniczności, co zasadniczo prowadzi do:

- lokalnych zmian cech wytrzymałościowych,
- niestabilności cech mechanicznych i parametrów fizycznych, spowodowanych np. obecnością wodoru lub temperaturą.

Aktualne metody mechaniki pęknięcia są szeroko stosowane w ocenie odporności na pęknięcie i wymiarowaniu konstrukcji wykonanych głównie z materiałów o wysokiej wytrzymałości. Należą do nich wielkogabarytowe konstrukcje stalowe, urządzenia energetyczne, konstrukcje okrętowe, a także pojazdy szynowe o specjalnym przeznaczeniu itp. Mniejsze zastosowanie znalazły natomiast w obliczeniach i wymiarowaniu konstrukcji oraz maszyn wykonanych z materiałów o niskiej wytrzymałości. Chodzi tu głównie o niskowęglowe lub niskostopowe stale ferrytyczne.

Wymiarowanie konstrukcji w aspekcie mechaniki pęknięcia wykonuje się według jednego z dwóch warunków:

- krytycznego rozmiaru wady tolerowanej (pęknięcia) przy zadanym obciążeniu,
- krytycznego obciążenia przy znanych rozmiarach wady (pęknięcia).

W odniesieniu do podstawowego kryterium liniowej mechaniki pęknięcia  $K_I \leq K_{IC}$ , praktycznym sposobem realizacji ww. postulatów jest np. transformacja zależności [1]:

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} F_I(\alpha, B) \quad (1)$$

w formę użyteczną do oceny:

– wymiaru dopuszczalnej wady

$$a \leq \frac{K_I^2}{\pi [\sigma \cdot F_I(\alpha, B)]} \quad (2)$$

– wartości naprężeń dopuszczalnych

$$\sigma \leq \frac{K_I}{\sqrt{\pi a} F_I(\alpha, B)} \quad (3)$$

Zależność (1) opisuje wartość współczynnika intensywności naprężenia  $K_I$  dla płyty o skończonych wymiarach ( $W$  – szerokość,  $2H$  – wysokość) ze szczeliną  $2a$  usytuowaną w centralnej części płyty i rozciąganej naprężeniem  $\sigma$  normalnym do powierzchni szczeliny, gdzie:

$$\alpha = \frac{2a}{W} \quad ; \quad B = \frac{2H}{W}$$

$F_I(\alpha, B)$  - funkcja określona wg [1].

Jest faktem, że istnieje asymetria w zakresie oceny lewej i prawej strony kryteriów mechaniki pękania. Istotnym odstępstwem od zasad modelowania i poprawnego wymiarowania jest przyjęcie jako stałych cech własności mechanicznych materiałów i jego izotropowości. Sytuacja taka może wystąpić np. w złączach spajanych w wyniku lokalnej heterogeniczności w skali mikro- i makroskopowej lub w obecności wodoru jako podstawowych rozwiązań mechaniki pękania i wprowadzenie zmodyfikowanego modelu ciała. W przypadku znaczącego zróżnicowania cech własności mechanicznych składników mikrostruktury, np. martenzytu i bainitu lub perlitu i ferrytu, poprawna ocena relacji struktura – własności mechaniczne takiego materiału wymaga uwzględnienia wpływu więzów mechanicznych (constraint effect). Taka sama sytuacja wystąpi w skali makroskopowej w przypadku występowania stref o zróżnicowanych własnościach mechanicznych, co ma miejsce w czasie obróbki plastycznej lub cieplnej, odlewach lub połączeniach spajanych. Szerzej problem ten scharakteryzowano w pracach [2, 3].

### 3. ANALIZA WYMIAROWA PROCESÓW TECHNOLOGICZNYCH

Zgodnie z EN 729 zapewnienie jakości połączeń spawanych wymaga wszechstronnej analizy, głównie na płaszczyźnie:

1) poprzedzającej proces spawania i obejmującej:

- cechy konstrukcyjne połączeń i wytworu,
- wyszczególnienie procedury spawania,
- optymalizację parametrów spawania,
- prawidłowy sprzęt spawalniczy, zapewniający realizację ww. wskazań,
- usunięcie potencjalnych źródeł zakłócających jakość,

- 2) bieżącej, aktywnej korekty procesu spawania, w tym:
  - monitorowania procesu spawania,
  - kontroli sprzężeń zwrotnych (synergii) procesu,
- 3) analizy i korekty po zakończeniu spawania, w tym:
  - diagnozy przyczyn pojawienia się wad,
  - analizy wymiarowej procesu, pozwalającej na usunięcie przyczyn zakłóceń jakości połączeń.

Powyższe zadania są rozwiązywane w oparciu o:

- praktyczne ustalenia i badania połączeń,
- systemy ekspertowe bazujące na bankach danych oraz komputerowe symulacje, wynikające z teoretycznej wiedzy o procesie spawania.

Dobrym przykładem rozwiązywania problemów jakościowych połączeń spajanych na płaszczyźnie praktycznych badań i ustaleń jest omówiona norma DIN 6700.

Drugi sposób opiera się na modelowaniu procesu z uwzględnieniem zjawisk termodynamicznych, termomechanicznych oraz przemian mikrostrukturalnych jako skutku działania źródeł ciepła o odpowiedniej konfiguracji i mocy, obecności jeziora spawalniczego o żądanym kształcie i cech konstrukcji. Stwarza to podstawy do wykonania analizy wymiarowej procesu, wynikającej z fizycznej analizy procesu spawania.

Proces spajania – w tym i spawania – ma charakter dynamiczny i jest związany z lokalną zmianą energii w wyniku doprowadzenia jej na sposób ciepła, bądź w wyniku wykonanej pracy oddziaływań siłowych lub równoczesnego oddziaływania obydwu form energii. Energię wewnętrzną układu spajanego możemy więc określić ogólną zależnością:

$$E = \sum_{i=1}^n \varphi_i \psi_i \quad (4)$$

gdzie:

- $\varphi_i$  - parametr intensywny,
- $\psi_i$  - parametr ekstensywny.

Doboru odpowiedniego parametru intensywnego  $\varphi_i$  związanego z odpowiednią wielkością ekstensywną i energią  $E$  można dokonać według zależności:

$$\varphi_i = \frac{\partial E}{\partial \psi_i} \quad (5)$$

Z powyższego wynika więc, iż znajomość przebiegu procesów termodynamicznych w czasie powstawania złącza spajanego, wiążących parametry ekstensywne z doбором parametrów intensywnych, wskazują na możliwość aktywnego modelowania i sterowania np. procesem spawania. Ponadto są użyteczne w budowie systemów ekspertowych. Przepływ energii dostarczonej na sposób ciepła określa naturę cyklu cieplnego zarówno spawania, jak i lutowania, a w dalszej kolejności kształt spoiny, proces krystalizacji oraz transformację mikrostruktury w spoinie i strefie wpływu ciepła. Sam przebieg procesu uzależniony jest również od innych zjawisk fizycznych, towarzyszących np. przepływowi prądu, zjawiskom elektromagnetycznym itp., w czasie różnych odmian spawania łukowego.

Proces tworzenia się spoiny, zgodnie z równaniem Naviera-Stokesa, charakteryzuje hydrodynamikę jeziora spawalniczego [3]. Jego kształt – uzależniony w głównej mierze od wartości gęstości strumienia energii na sposób ciepła – zależy również od intensywności oddziaływań spowodowanych przez:

- lokalną zmianę gęstości płynnego metalu w jeziorce spawalniczym,
- asymetryczne pole elektromagnetyczne, wpływające na ruch płynnego metalu i wywieraną siłę wyporu,
- gradient napięcia powierzchniowego, powodujący naprężenia ścinające i ruch cieczy oraz wpływający na głębokość penetracji i przetopu,
- proces parowania metalu, zwłaszcza przy wyższych parametrach prądowych, również wpływający na głębokość przetopu.

W przypadku użycia wysokoskoncentrowanych źródeł energii (lasera, wiązki elektronowej, strumienia plazmy) forma kształtowania spoiny zależy również od wartości gęstości strumienia energii i wywieranego przez niego ciśnienia oraz sił spowodowanych przez:

- ciśnienie wywierane przez pary metali,
- ciśnienie napięcia powierzchniowego,
- ciśnienie grawitacyjne,
- ciśnienie odrzutu.

Ilościową ocenę ww. oddziaływań przedstawiono w opracowaniu [3]. Z powyższych ustaleń wynika istotność przyjętego do obliczeń modelu źródła ciepła. W praktyce na uwagę zasługują dwa modele:

- cylindryczno-potęgowo-normalny (C-P-N) [4]:

$$q_v = \frac{k K_z Q}{\pi(1 - \exp(-K_z \cdot s))} e^{-k(x^2+y^2) - K_z \cdot z} (1 - u(z-s)) \quad (6)$$

- podwójnej elipsoidy (PE) [5]:
- przednia część źródła

$$q_{vp} = f_p \frac{6\sqrt{3}Q}{a_1 b c \pi \sqrt{\pi}} e^{\frac{-3x^2}{a_1^2}} e^{\frac{-3y^2}{b^2}} e^{\frac{-3z^2}{c^2}} \quad (7)$$

- tylna część źródła

$$q_{vt} = f_t \frac{6\sqrt{3}Q}{a_2 b c \pi \sqrt{\pi}} e^{\frac{-3x^2}{a_2^2}} e^{\frac{-3y^2}{b^2}} e^{\frac{-3z^2}{c^2}} \quad (8)$$

gdzie:

$$f_p + f_t = 2 ; (1 - u(z-s)) = u(s-z) ; a_1 \neq a_2 ; b_1 = b_2 = b ; c_1 = c_2 = b$$

k – współczynnik koncentracji źródła ciepła,  $1/\text{cm}^2$ ,

$K_z$  – współczynnik potęgowy źródła ciepła,  $1/\text{cm}$ ,

s – głębokość działania źródła ciepła, cm,

$u(s-z)$  – skokowa funkcja Heaviside'a,

Q – praca źródła ciepła, J,

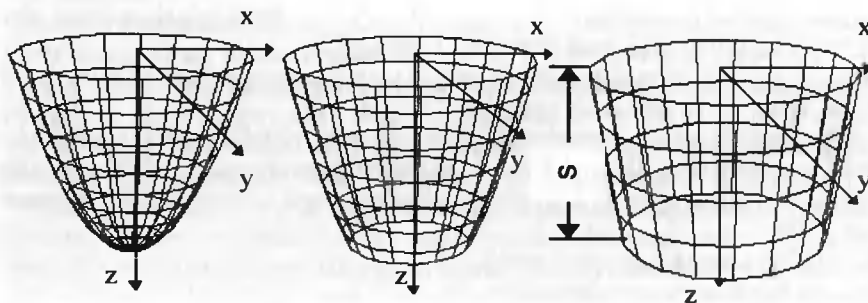
$a_1, b_1, c_1$  – półosie części przedniej źródła, cm,

$a_2, b_2, c_2$ - półosie części tylnej źródła, cm,

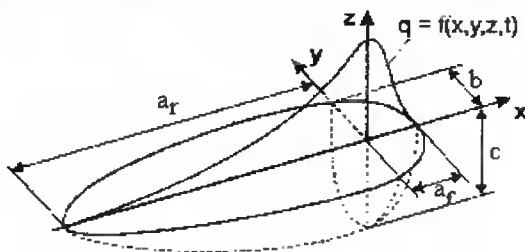
$f_p$  - udział energii wydzielającej się w przedniej części źródła ciepła,  $0 \div 2$ ,

$f_t$  - udział energii wydzielającej się w tylnej części źródła ciepła,  $0 \div 2$ .

Na rysunkach 1 i 2 przedstawiono graficzne przykłady interpretacji opisanych równaniami (6)-(8) modeli źródeł ciepła.



Rys. 1. Przykłady parabolicznego kształtu C-P-N źródeł ciepła przy  $q_v = \text{const}$  [4]



Rys. 2. Źródło ciepła o charakterze PE z zaznaczeniem głównych osi  $a_f + a_r, b, c$  [5]

Pierwszy model (C-P-N) wydaje się lepiej odzwierciedlać sytuację przy spawaniu wysokoskoncentrowanymi źródłami ciepła, np. strumieniem plazmy, laserem czy wiązką elektronów, a nawet metodą GTA czy GMA. Drugi model (PE) wydaje się być bardzo użyteczny przy użyciu źródeł ciepła o mniejszej gęstości mocy, np. dla metod spawania opartych na swobodnym jarzeniu się łuku elektrycznego. Na uwagę zasługuje szczególnie wysoka elastyczność C-P-N źródła ciepła poprzez parametry  $k, K_z$  oraz skokowej funkcji Heaviside'a, zawierającej w swoim opisie wszystkie klasyczne źródła ciepła.

Aktualnie, w wielu rozwiązaniach, w tym w systemach ekspertowych, dominuje model oparty na powiązaniu mocy źródła z rozkładem normalnym Gaussa, co wydaje się szczególnie niestosowne przy wysokiej koncentracji źródła ciepła. Przyjęcie odpowiedniego modelu jest warunkiem podstawowym związanym z określeniem skutków procesu spawania

Przykład rozwiniętego rozwiązania oceny ustalonego i nieustalonego pola temperatur dla procesu spawania płyty o dowolnej grubości z wymianą ciepła na powierzchniach ograniczających i użycie modelu C-P-N źródła ciepła przedstawia zależność [4]:

– względem nieruchomego układu współrzędnych:

$$T(x_0, y_0, z_0, t) = \frac{q \cdot k \cdot K_z}{\pi \cdot c \cdot (1 - \exp(-K_z \cdot s))} \cdot \int_0^t \frac{u(t') \cdot dt'}{(1 + 4 + \alpha \cdot k \cdot (t - t'))} \cdot \exp\left(-\frac{k \cdot ((x_0 - v \cdot t')^2 + y^2)}{4 \cdot \alpha \cdot k \cdot (t - t') + 1}\right) \cdot \sum_{i=1}^{\infty} B_i \cdot C_i \cdot D_i \cdot \exp(-\alpha \cdot r_i^2 \cdot (t - t')) \quad (9)$$

gdzie:

$$B_i = \cos(r_i \cdot z_0) + \frac{\alpha_0}{\lambda \cdot r_i} \cdot \sin(r_i \cdot z_0) \quad (10)$$

$$C_i = \frac{2 \cdot r_i^2}{\left[\left(\frac{\alpha_0^2}{\lambda^2} + r_i^2\right) \cdot \left(g + \frac{\alpha_1 \cdot \lambda}{\alpha_1^2 + r_i^2 \cdot \lambda^2}\right) + \frac{\alpha_0}{\lambda}\right]} \quad (11)$$

$$D_i = \exp(-K_z \cdot s) \frac{(-K_z \cdot \cos(r_i \cdot s) \lambda \cdot r_i + r_i^2 \cdot \sin(r_i \cdot s) \lambda - \alpha_0 \cdot r_i \cdot \cos(r_i \cdot s)) - \frac{-\alpha_0 K_z \sin(r_i \cdot s)}{(K_z^2 + r_i^2) \cdot \lambda} + \frac{K_z \cdot \lambda + \alpha_0}{(K_z^2 + r_i^2) \cdot \lambda}}{(K_z^2 + r_i^2) \lambda \cdot r_i} \quad (12)$$

$r_1, r_2, r_3 \dots (r_i)$  - pierwiastki równania:

$$\text{ctg}(r_i \cdot g) = \frac{\lambda^2 \cdot r_i^2 - \alpha_0 \cdot \alpha_1}{\lambda \cdot r_i (\alpha_0 + \alpha_1)} \quad (13)$$

– względem ruchomego układu współrzędnych:  $x = x_0 - vt$ ,  $y = y_0$ ,  $z = z_0$ :

$$T(x, y, z, t) = \frac{q \cdot k \cdot K_z}{\pi \cdot c \cdot (1 - \exp(-K_z \cdot s))} \cdot \int_0^t \frac{u(t') \cdot dt'}{(1 + 4 + \alpha \cdot k \cdot (t - t'))} \cdot \exp\left(-\frac{k \cdot ((x + v \cdot (t - t'))^2 + y^2)}{4 \cdot \alpha \cdot k \cdot (t - t') + 1}\right) \cdot \sum_{i=1}^{\infty} B_i \cdot C_i \cdot D_i \cdot \exp(-\alpha \cdot r_i^2 \cdot (t - t')) \quad (14)$$

gdzie:

$$B_i = \cos(r_i \cdot z) + \frac{\alpha_0}{\lambda \cdot r_i} \cdot \sin(r_i \cdot z) \quad (15)$$

natomiast wartości  $C_i$ ,  $D_i$  i pierwiastków  $r_i$  są analogiczne jak w układzie nieruchomym (11)-(13).

Przedstawiona forma rozwiązania jest oczywiście zbyt trudna i pracochłonna do bezpośrednich obliczeń analitycznych oraz nieodpowiednia w przypadku obliczeń kom-

puterowych. Analiza pól temperaturowych w czasie stanie się jednak możliwa przy pewnej dyskretyzacji tych równań, umożliwiającej kalkulację komputerową z określoną dokładnością. Kompletnie rozwiązania dla ww. modeli źródeł ciepła wraz z adaptacją do obliczeń numerycznych o charakterze nieliniowym oraz algorytmem postępowania z wykorzystaniem programu MATHCAD przedstawiono w opracowaniu [6].

#### 4. WNIOSKI

Przyjęcie powyższych rozwiązań umożliwia bardzo dokładną analizę wymiarową procesu spajania – spawania, zgrzewania. Dzięki ilościowej ocenie zjawisk związanych z procesem fizycznym procesu spawania możliwe jest przewidywanie skutków procesu spawania: kształtu spoiny, struktury spoiny i SWC oraz cech mechanicznych złączy spawanych. Ma to istotny wpływ na jakość powstałych złączy oraz niewątpliwym efektem ekonomicznym. Rozszerzona analiza wymiarowa jest najczęściej realizowana poprzez rozwinięte systemy ekspertowe, np. SYSWELD, umożliwiające bezpośrednią adaptację bardzo złożonych zagadnień naukowych dla potrzeb przemysłu.

#### LITERATURA

- [1] Neimitz A., 1998: Mechanika pękania. PWN Warszawa.
- [2] Ranatowski E., 2000: Constrained effect and fracture of mismatched weld joints. ECF-13. Fracture mechanics: applications and challenges. Section - Elastic plastic fracture mechanics. Chapter 12. Edited by M. Fuentes, M. Elices et al., Elsevier Science Ltd.
- [3] Ranatowski E., 1999: Elementy fizyki spajania metali. Wyd. Uczeln. ATR w Bydgoszczy
- [4] Ranatowski E., Poćwiardowski A., 1998: An analytic - numerical evaluation of the thermal cycle in the HAZ during welding. Mathematical Modelling of Weld Phenomena IV. Edited by H. Cejra. Cambridge, UK, Book 695.
- [5] Goldak J. et al., 1984: A new finite element model for welding heat sources. Metallurgical Transactions B., Vol. 158.
- [6] Ranatowski E., Poćwiardowski A., 1998: An analytic - numerical estimation of the thermal cycle during welding with various heat source models application. Mathematical Modelling of Weld Phenomena IV. Edited by H. Cejra. Cambridge, UK, Book 695.

### COMMENTS ON THE APPLICATION OF WELDING METHODS IN RAILWAY AS A DIMENSIONING ANALYSIS; SAMPLED APPLICATIONS

#### Summary

Part one presents a potential for the application of fracture parameters and criteria to enhance dimensioning analysis to assess the material effort for product designing and evaluating the material susceptibility to welding. Additionally practical guidelines are given to enhance thermal cycle dimensioning analysis.



## **PRZYPADEK PĘKANIA DZIOMBIC ROZJAZDU KOLEJOWEGO**

Stanisław Dymski, Eugeniusz Ranatowski, Jan Szafrąński

Katedra Inżynierii Materiałowej  
Akademia Techniczno-Rolnicza w Bydgoszczy  
Al. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz

Przedstawiono badania związane z ujawnieniem przyczyn pęknięcia w zgrzei-  
nach rozjazdów kolejowych. Zaprezentowano wyniki badań metaloznawczych  
zgrzewanych oporowo złączy, składających się z dziobnicy i szyn rozjazdowych.  
Analiza wyników badań stała się podstawą do ustalenia najbardziej prawdopodob-  
nych przyczyn pęknięcia połączeń zgrzewanych i podano zalecenia w celu ich wy-  
eliminowania

### **1. WPROWADZENIE**

Nowoczesne torowiska kolejowe budowane są z szyn i rozjazdów łączonych ze so-  
bą bezстыkowo. Taki postęę w budowie dróg kolejowych stał się możliwy dzięki inży-  
nierii spajania [1].

Kolejowy tor bezстыkowy jest korzystny w eksploatacji, a zwłaszcza nie ogranicza  
prędkości jazdy taboru kolejowego. Jazda po nim powinna być bezpieczna, stwarzać  
komfortową podróż pasażerom i być przyjazna dla środowiska naturalnego.

Gwarancją bezawaryjnej eksploatacji drogi kolei szynowej i taboru kolejowego  
jest opanowanie technologii łączenia elementów jezdnych toru kolejowego.

Hutnictwo na świecie produkuje szyny kolejowe ze stali eutektoidalnej. Wytrzy-  
małość na rozciąganie stali szynowej wynosi  $685 \div 1080$  MPa, a jej odporność na zużycie  
ścierne zależy od wytrzymałości. Trwają poszukiwania stali o własnościach lepszych od  
dotychczas wytwarzanych, ponieważ ciągle rośnie obciążenie szyn kolejowych [2, 3].

Prowadzone są prace nad nowymi gatunkami stali wysokowytrzymałych przezna-  
czonych do budowy torowisk kolejowych, takimi jak na przykład: obrobione cieplnie,  
o strukturze bainitycznej, a nawet martenzytycznej [2].

Szyny kolejowe łączy się za pomocą doczołowego zgrzewania oporowego iskro-  
wego i spawania termitowego [1, 3-5].

Celem pracy jest analiza przypadków pęknięcia w procesie wytwarzania elementu  
torowiska.

## 2. ZGRZEWANIE ELEMENTÓW ROZJAZDU KOLEJOWEGO

W niniejszym opracowaniu poddano analizie doczołowo zgrzane iskrowo elementy dziobnicy i dwóch odcinków walcówek szyn rozjazdowych. Dziobnica miała kształt klina i była wykonana ze stali St90PA (PN-84/H-84027/07). Odcinki rozjazdowe były wykonane z szyny normalnotorowej typu S49.

Czoło zgrzewanych elementów rozjazdu kształtuje się za pomocą obróbki skrawaniem. Spajanie odbywa się za pomocą zgrzewarki szwajcarskiej firmy SCHLATTER. Przebieg procesu zgrzewania składa się z 4 faz i jest typowy, jak dla szyn torowych. Po zgrzaniu elementów natychmiast usuwa się wypływkę na całym obwodzie zgrzeiny za pomocą młotków pneumatycznych.

Po zgrzewaniu boczne powierzchnie łącznika szyny są frezowane. Pęknięcia pojawiły się po tej operacji na jednej z powierzchni bocznej łącznika między główką a stopą szyny. Pęknięcia te znajdowały się w strefie zgrzewania w postaci linii pionowej, prostopadłej do płaszczyzny stopy.

Powierzchnia toczna na główce dziobnicy i części rozjazdowych jest utwardzana palnikami acetylenowo-tlenowymi. Operację tę wykonuje się w celu zwiększenia twardości powierzchni tocznej rozjazdu kolejowego.

Pęknięcia w strefie zgrzewania zaobserwowano również podczas utwardzania powierzchniowego.

W celu ograniczenia pęknięcia stosowano grzanie powierzchniowe przy użyciu palników acetylenowo-tlenowych.

## 3. BADANIA WŁASNE

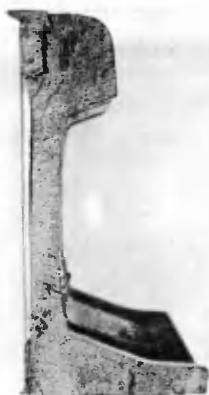
Badaniom fraktograficznym i metalograficznym poddano fragmenty dwóch dziobnic (A, B) i szyn rozjazdowych. Rysunek 1 pokazuje przełom na powierzchni czołowej dziobnicy B.



Rys. 1. Powierzchnia przełomu próbki (dziobnica B)

Na fotografii jest widoczne miejsce styku powierzchni szyn rozjazdowych. Na przekroju główki i stopy odkuwki dziobnicy przełom jest prawie jednolity, natomiast

w środku części pionowej dziobnicy jest widoczna jasna, błyszcząca, lekko zaokrąglona krawędź powierzchni pochodzącej od jednej z szyn rozjazdowych. Takie samo zaokrąglenie obserwuje się na pionowej powierzchni wewnętrznej łącznika szyny rozjazdowej (rys. 2), która odpowiada stronie lewej dziobnicy B (rys.1). Powierzchnię wewnętrzną szyny rozjazdowej I pokazano na rysunku 3. Powierzchnia ta styka się z powierzchnią szyny rozjazdowej II. Na całym przekroju szyny są widoczne ślady po obróbce skrawaniem – frezowanie głowicą wielostrzową. Po stronie prawej na rysunku 3 jest widoczna zaokrąglona krawędź powierzchni wewnętrznej szyny. To charakterystyczne zaokrąglenie krawędzi powierzchni wewnętrznej jest bardzo podobne do tego, które zaobserwowano w szynie rozjazdowej I, wchodzącej w skład dziobnicy A. W tym konkretnym przypadku zaokrąglenie krawędzi powierzchni wewnętrznej szyny rozjazdowej zaobserwowano prawie na całej wysokości szyny, tj. od powierzchni jezdnej do stopy. Takie same zaokrąglenia powierzchni wewnętrznej szyn rozjazdowych stwierdzono w badanych dziobnicach A i B w strefie zgrzewania



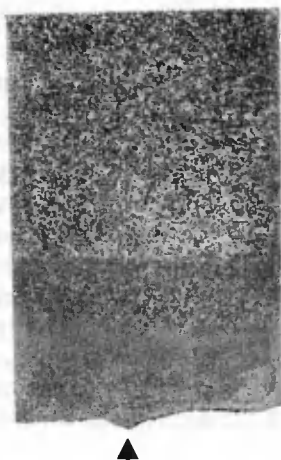
Rys. 2. Przełom szyny rozjazdowej I



Rys. 3. Powierzchnia wewnętrzna szyny rozjazdowej I

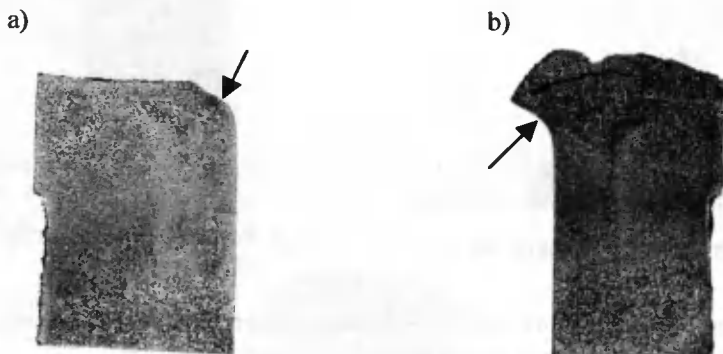
Dla wybranych przekrojów złączy zgrzewanych wykonano badania makroskopowe. Z fragmentów zgrzein wycięto z odpowiednich miejsc próbki.

Próbka 1 została wycięta ze środkowej części łącznika dziobnicy B, a powierzchnie makrozglądu wykonano na płaszczyźnie wzdłużnej do kierunku walcowania. Na obrazie w dolnej części widoczna jest krawędź powierzchni przełomu, a tuż nad nią strefa wpływu ciepła (rys. 4). Na obrazie miejsce styku szyn rozjazdowych wskazano strzałką. Na odcinku linii zgrzewania, po prawej stronie, znajdowała się szyna rozjazdowa II, a po lewej stronie szyna rozjazdowa I. W środku jest fragment przełomu w postaci trójkątnego występu (oznaczony strzałką), należący do szyny rozjazdowej II. Linia końca strefy wpływu ciepła jest równoległa do krawędzi przełomu.



Rys. 4. Obraz makroskopowy przekroju środka łącznika dziobnicy B.  
Trawienie 50 % roztworem wodnym HCl

Rysunek 5 pokazuje przekrój wzdłużny z środkowej części pionowego łącznika szyny rozjazdowej I i II.



Rys. 5. Obraz makroskopowy przekroju środka łącznika szyny rozjazdowej I (a) i II (b)

Strzałki na fotografii pokazują zaokrąglenia powierzchni wewnętrznej łącznika szyny rozjazdowej I i II.

We fragmencie łącznika szyny rozjazdowej I, pokazanym na rysunku 5a, od góry widoczna jest krawędź przełomu, biegnąca w zgrzebinie, a po stronie prawej – krawędź powierzchni wewnętrznej łącznika. W górnej części, przy linii zgrzewania krawędź ta jest zaokrąglona (oznaczono strzałką). To zaokrąglenie jest odwzorowaniem krawędzi powierzchni wewnętrznej łącznika z szyny rozjazdowej II (rys. 5b).

Na przekroju próbki łącznika linia końca strefy wpływu ciepła jest ukośna. Po stronie powierzchni zewnętrznej (lewa strona obrazu) jest fragment wypłytki materiału szyny. Pod górnym brzegiem próbki – krawędź przełomu – można zauważyć lekko zarysowane odkształcenia plastyczne w lewą stronę, tzn. w kierunku na zewnątrz połączenia zgrzewanego.

W górnej części próbki wyciętej z łącznika szyny rozjazdowej II (rys. 5b) jest widoczny materiał odkuwki dziobnicy B. W tym fragmencie, między krawędzią przełomu i linią zgrzewania, występują pęknięcia poprzeczne. Linia zgrzewania przebiega po małym łuku. W środku próbki łącznika szyny jest pionowa linia o barwie ciemniejszej, która w sąsiedztwie linii zgrzewania odchyła się w prawą stronę, w kierunku powierzchni zewnętrznej łącznika. Na brzegu próbki po stronie prawej znajduje się wypływka. Po stronie lewej próbki jej brzeg, a poniżej linii zgrzewania krawędź powierzchni wewnętrznej są odchyłone w lewo. Ten odcinek krawędzi jest odwzorowaniem zewnętrznego zaokrąglenia występującego w próbce szyny rozjazdowej I na rysunku 5a. Szerokość strefy wpływu ciepła na przekroju łącznika, podobnie jak w próbce szyny rozjazdowej I jest różna. Większa szerokość jest po stronie powierzchni wewnętrznej niż po stronie zewnętrznej. Ta zróżnicowana szerokość strefy wpływu ciepła w łączniku jest wynikiem ograniczonego odkształcenia plastycznego podczas spęczania.

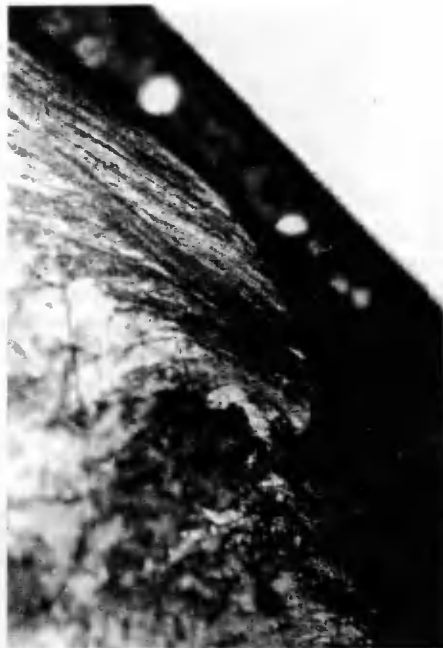
Struktura siatkowego ferrytu na tle drobnopłytkowego perlitu, odznaczająca się gruboziarnistością i tworząca zamkniętą siatkę charakteryzuje strefę zgrzewania w dziobnicy B (rys 6).



Rys. 6. Struktura strefy zgrzewania dziobnicy B.

Trawienie 2 % alkoholowym roztworem  $\text{HNO}_3$ . Pow. 100x

Drobnopłytkowy perlit, w pobliżu zaokrąglenia powierzchni wewnętrznej, występuje w środku łącznika w szynie rozjazdowej I. W pewnym fragmencie zaokrąglenia zaobserwowano strukturę pokazaną na rysunku 7.



Rys. 7. Struktura po stronie wewnętrznej w środku łącznika szyny rozjazdowej I na fragmencie zaokrąglenia. Trawienie 2 % alkoholowym roztworem  $\text{HNO}_3$ . Pow. 250x

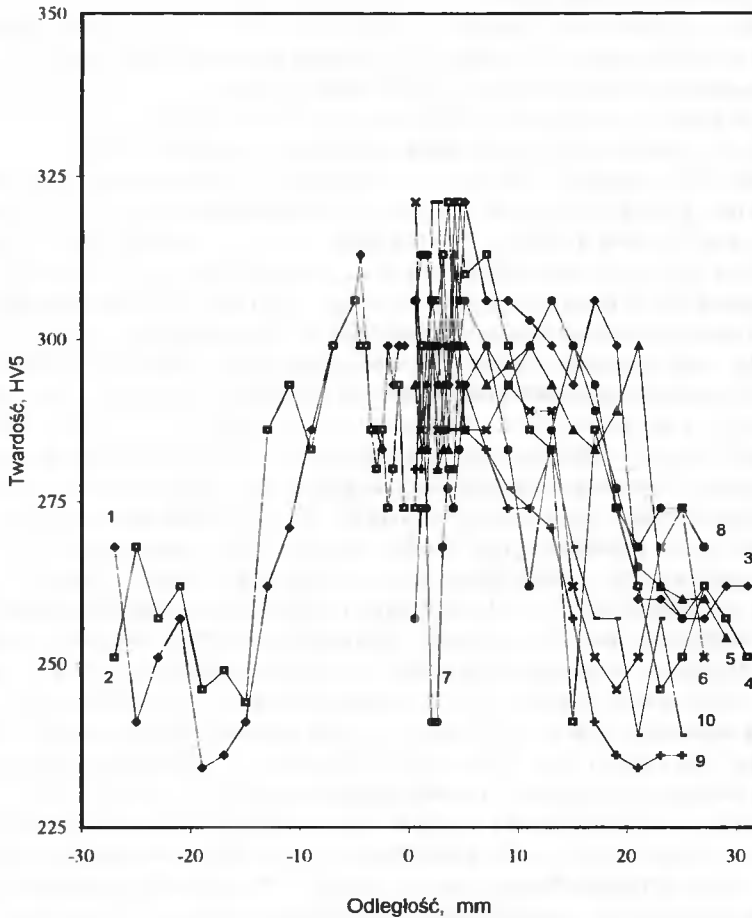
Zbliżoną, charakterystyczną strukturę zaobserwowano w próbce wyciętej z głowy szyny rozjazdowej I (rys.8).



Rys. 8. Struktura po stronie wewnętrznej próbki wyciętej z głowy szyny rozjazdowej I. Trawienie 2% alkoholowym roztworem  $\text{HNO}_3$ . Pow. 100x

Struktura na rysunkach 7 i 8 jest typową strukturą, która powstała w wyniku odkształcenia plastycznego na zimno. Struktura taka odznacza się kierunkowym „płynięciem materiału” i powstała w dolnej części główki szyny, a także w części jej łącznika.

Twardość złącza zgrzewanego dziobnicy B przedstawiono na rysunku 9.



Rys. 9. Twardość fragmentów złącza zgrzewanego dziobnicy B: odkuwka dziobnicy B strona zewnętrzna (1) i środek (2), szyna rozjazdowa I próbka 1 strona zewnętrzna (3) i strona wewnętrzna (4), próbka 2 strona zewnętrzna (5) i strona wewnętrzna (6) oraz szyna rozjazdowa II próbka 1 strona zewnętrzna (7) i strona wewnętrzna (8) oraz próbka 2 strona zewnętrzna (8) i strona wewnętrzna (10)

#### 4. WYNIKI BADAŃ

Ogłędziny zewnętrzne elementów dziobnicy A i B dostarczyły szeregu znaczących informacji, dotyczących pęknięcia zgrzanych stali. Z obserwacji przełomów można stwierdzić, że na ich powierzchniach nie było żadnych wad materiałowych. Analiza porównawcza ziarnistości przełomów umożliwiła określenie przebiegu pęknięcia materiałów zgrzewanyc.

Obserwacje krawędzi powierzchni wewnętrznych na czole szyn rozjazdowych doprowadziły do stwierdzenia, że są one, prawie na całej wysokości szyny, zaokrąglone na zewnątrz i do wewnątrz. Krawędzie szyn rozjazdowych, które odznaczają się mniejszą szerokością przelomu, są odkształcone do wewnątrz, a szyny rozjazdowe o większej szerokości przelomu – na zewnątrz.

Wygląd krawędzi powierzchni wewnętrznych skłania do uznania, że podczas zgrzewania powierzchni te, przylegając do siebie w fazie spęczania uległy pod wpływem sił spęczających odkształceniu w określonym kierunku. W złączu zgrzewanym pierwotne pęknięcie nie było przypadkowe. Powstało i rozprzestrzeniało się w łączniku po stronie szyny rozjazdowej, której materiał odkształcił się do wewnątrz.

W złączach zgrzewanych odkuwki dziobnic i szyny rozjazdowe mają poprawną makrostrukturę. Pęknięcia powstały po tej samej stronie dla badanych przypadków, patrząc na czoło odkuwki dziobnicy. Nie stwierdzono wad materiałowych i zgrzewania. Strefy wpływu ciepła na przekrojach mają zróżnicowaną szerokość. To zróżnicowanie wynika z rozkładu temperatury na przekroju złączy. Przebieg linii końca wpływu ciepła informuje również o odkształceniu materiału czoła szyn po spęczaniu.

Badania makroskopowe wykazały, że materiał czoła po zewnętrznej stronie szyn rozjazdowych podczas zgrzewania odkształcał się swobodnie, bez ograniczeń w kierunku na zewnątrz, tworząc wypływkę. Natomiast w osi pionowej, na styku powierzchni wewnętrznej, spęczanie materiału szyn pod wpływem siły docisku zachodziło w ograniczonym zakresie. Świadczą o tym zaokrąglone krawędzie powierzchni, przylegających do siebie, szyn rozjazdowych. Należy podkreślić, iż w zestawie rozjazdowym, przed zgrzewaniem, szyny w pobliżu zgrzewanego czoła są ściskane złączem śrubowym.

Obserwacje zglądów makroskopowych pokazały, że pierwotne pęknięcia w złączu przebiegają najczęściej wzdłuż linii zgrzewania lub w jej pobliżu. Potwierdzają to spostrzeżenia z oględzin zewnętrznych przelomów odkuwek dziobnic i szyn rozjazdowych.

Nie stwierdzono w zgrzeinie i w strefie wpływu ciepła obecności martenzytu lub bainitu w strukturze stali. Natomiast w strukturze stali był drobnopłytkowy perlit z pełną lub niepełną siatką ferrytu, a w strefie wpływu ciepła był tylko drobnopłytkowy perlit.

Na przekroju zgrzeiny, tuż przy jej linii stwierdzono zróżnicowaną wielkość ziarna. Fakt ten świadczy o zaistniałym rozkładzie temperatury przy łączeniu elementów.

Dodatkowym dowodem na wystąpienie gradientu temperatury na przekroju złącza może być niejednorodność struktury zaobserwowana podczas badań mikroskopowych.

Stwierdzono istnienie struktury zgnicionej w warstwie podpowierzchniowej zaokrąglonych krawędzi szyn rozjazdowych. Na obrazach (rys. 7, 8) jest widoczna steksturowana struktura perlityczna. Takie odkształcenie stali w warstwie podpowierzchniowej powstało na skutek naprężeń własnych, występujących w złączu po procesie zgrzewania.

Pomiary twardości próbek wyciętych z miejsc zgrzewanych wykazują, że ekstremalne jej wartości są w strefie wpływu ciepła w bliskim sąsiedztwie płaszczyzny zgrzewania (rys. 9). Maksymalna twardość nie przekroczyła wartości 321 HV5. Twardość stali, poza strefą wpływu ciepła, materiału rodzimego, była w przedziale 234÷268 HV5. Rozkład twardości w złączu zgrzewanym, na próbkach wyciętych z główek i łączników odkuwki i szyn rozjazdowych, potwierdza zróżnicowaną szerokość strefy wpływu ciepła na przekroju.



## 5. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ I ZALECENIA

Z badania makroskopowego i pomiarów twardości zgodnie wynika, że strefa wpływu ciepła na przekroju szyny, a także pomiędzy złączami zgrzewanymi rozjazdów dziobnicy ma zróżnicowaną szerokość. Zwiększona szerokość strefy wpływu ciepła, tworzenie się siatki ferrytu i gruboziarnistość struktury przy płaszczyźnie zgrzewania wynikają z wysokiej temperatury procesu zgrzewania. Na tej podstawie można uważać, że złącze zostało przegrzane. Według autorów [3, 4] nadmiar ciepła w procesie zgrzewania wynika ze zbyt dużego natężenia prądu, dużej ilości impulsów podgrzewających oraz długiego czasu zgrzewania. W literaturze informuje się również, że przy optymalnych parametrach zgrzewania szyn strefa wpływu ciepła ma szerokość 20 mm na stronę. Przy czym pod pojęciem optymalnych parametrów określa się takie, które pozwalają uzyskać wytrzymałość złącza zbliżoną do wytrzymałości stali St90PA. W złączach dziobnic strefa ta ma szerokość około 25 mm.

Występująca siatka ferrytu na granicach ziarn byłego austenitu i gruboziarnistość struktury stali mogą być przyczyną pęknięć szyn w płaszczyźnie zgrzewania [2, 6]. To stwierdzenie nie odnosi się do przedmiotowych pęknięć dziobnic rozjazdów kolejowych, gdyż jak wykazały badania powierzchnia pęknięcia nie zawsze przebiegała w płaszczyźnie zgrzeiny.

Badania wykazały, że odkształcenia plastyczne na gorąco podczas spęczania w pionowej osi złącza zgrzewanego, biegnącej między powierzchniami wewnętrznymi szyn rozjazdowych oraz występowanie w nim naprężeń własnych, o wartości przekraczającej wytrzymałość stali, było najprawdopodobniej przyczyną pęknięcia.

W strefie złącza zgrzewanego podczas chłodzenia powstają naprężenia cieplne. Kurczenie się metali na powierzchni nie przebiegało swobodnie, ponieważ ograniczał to rozszerzony, gorący rdzeń szyny. Powodowało to wytworzenie się naprężeń rozciągających w warstwie podpowierzchniowej i ściskających w rdzeniu. Chłodzenie do temperatury otoczenia (ok. 20°C) przyczyniło się do wytworzenia w całym przekroju rozkładu naprężeń. Rdzeń pozostawał pod działaniem naprężeń rozciągających, a warstwa wierzchnia – ściskających.

W stali St90PA, w strefie wpływu ciepła w obszarach nagrzanych do temperatury austenitizowania, podczas chłodzenia zachodzi przemiana eutektoidalna. Wywołuje ona zmiany objętości właściwej i wymiarów. W wyniku tej przemiany wymiary podczas chłodzenia się zwiększają. Literatura podaje, że dla stali o zawartości około 0,8 % C przemiana eutektoidalna wywołuje zmiany wymiarów liniowych  $\Delta l \cong 1 \%$ , a objętości  $\Delta V \cong 3 \%$ .

Naprężenia cieplne i strukturalne oraz powstałe w wyniku asymetrycznych odkształceń plastycznych nałożyły się na siebie. Naprężenia strukturalne zwiększają lub zmniejszają naprężenia cieplne w zależności od wielkości przekroju i szybkości chłodzenia. Istnienie naprężeń własnych potwierdza zaobserwowany zgniot podpowierzchniowy na styku powierzchni wewnętrznych, na zaokrąglonych krawędziach szyn rozjazdowych. Skupienie naprężeń rozciągających, na odcinku łącznika, w okolicach zgrzania dwóch oddzielnych części, o wartości przekraczającej wytrzymałość stali spowodowało pęknięcie w złączach zgrzewanych. Naprężenia własne można zaliczyć do czynników sprzyjających pękaniu materiałów, lecz zawsze zależy to od ich wartości. Do sprzyjających czynników można zaliczyć: szerokość strefy wpływu ciepła w złączu zgrzewanym, strukturę w sąsiedztwie płaszczyzny zgrzewanej, a także rozwiązanie technologiczne elementów zgrzewanych.

## Zalecenia:

- 1) doczołowe zgrzewanie oporowo iskrowe rozjazdu kolejowego, składającego się z dziobnicy i szyn rozjazdowych, powinno odbywać się przy parametrach, gwarantujących stałą szerokość strefy wpływu ciepła,
- 2) zmniejszyć wartość naprężeń własnych złącza,
- 3) zmienić kształt czoł złącza w celu wyeliminowania zaokrąglania krawędzi wewnętrznych szyn rozjazdowych, których powstanie najprawdopodobniej przyczyniło się do pęknięcia dziobnic.

## LITERATURA

- [1] Wielgosz R., Zając A., 2001: Badania porównawcze SWC złączy szyn zgrzewanych elektrycznie i spawanych termitowo. Zesz. Nauk. ATR w Bydgoszczy, Mechanika 50, 209.
- [2] Krawczyk I., Pacyna J., 2000: Kierunki rozwoju stali na szyny kolejowe. Zesz. Nauk. Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach, Mechanika 72, 388.
- [3] Dziubiński J., Szymański A., 1988: Zgrzewanie iskrowe szyn kolejowych. Cz. I. Przegląd Spawalnictwa 1, 1.
- [4] Dziubiński J., Szymański A., 1988: Zgrzewanie iskrowe szyn kolejowych. Cz. II. Przegląd Spawalnictwa 2, 12.
- [5] Dziubiński J., Szymański A., 1990: Abbrennstrumpfschweissen von Schienen und mechanische Eigenschaften der Verbindungen. Schweissen und Schneiden 42, 1, 22.
- [6] Dziubiński J., Adamiec P., Lalik S., 1994: Wykonanie badań wytrzymałościowych złącza zgrzewanego dziobnicy. Praca naukowo-badawcza (niepublikowana), Politechnika Śląska Instytut Transportu, Katowice.

## CASE OF CROSSOVER RAIL-STEM FRACTURE

## Summary

The paper investigates the reasons of crossover weld fracture. Metal study results are presented for resistance-welded joints made of rail stem and rail crossover. The result analysis reveals most probable reasons for welded joint fractures and offers guidelines for fracture elimination.



ISSN 0208-6395