

# WPŁYW FERRYTU DELTA NA WŁAŚCIWOŚCI STALI AUSTENITYCZNYCH



**ROBERT WERSTA**

Kierownik Działu Oceny Zgodności  
Urząd Dozoru Technicznego  
Oddział we Wrocławiu



**ANDRZEJ KLIMECKI**

Ekspert Urzędzeń Ciśnieniowych  
Dział Urzędzeń Ciśnieniowych  
Urząd Dozoru Technicznego  
Oddział we Wrocławiu



**PAWEŁ GRZEŚKOWIAK**

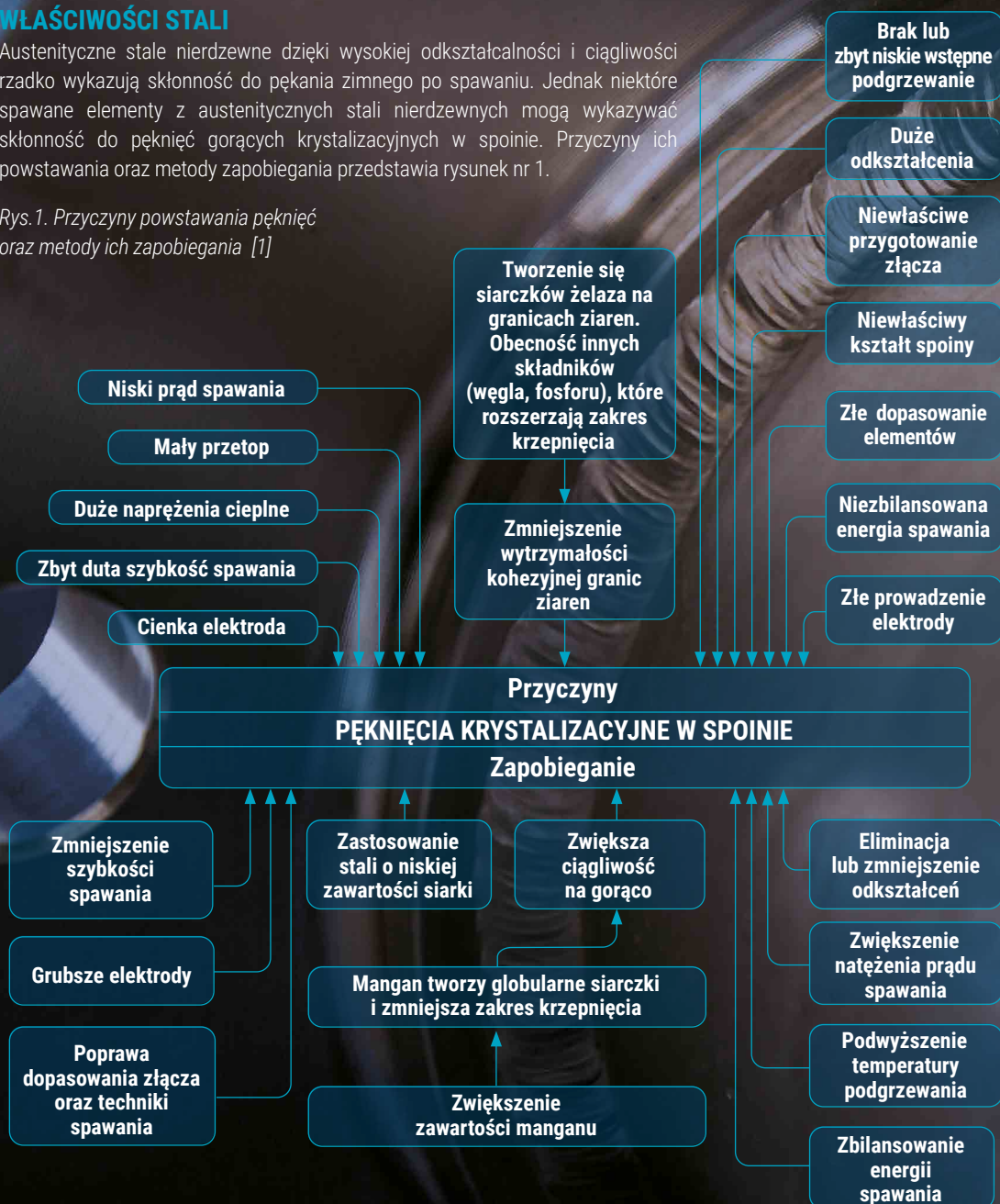
Główny Specjalista ds. Badań Materiałowych  
Dział Badań Laboratoryjnych  
Urząd Dozoru Technicznego  
Oddział w Poznaniu

Niewątpliwie powszechnie wykorzystywanymi zaletami stali nierdzewnych austenitycznych jest ich odporność na korozję oraz wysokie i niskie temperatury, trwałość czy efektywny wygląd. Stale o strukturze austenitycznej zawierają mniejszy lub większy udział ferrytu delta w strukturze. W przypadku spawania tych stali może wystąpić zjawisko kruchości, co w efekcie również niekorzystnie wpływa na odporność korozyjną. W praktyce inżynierskiej resztki ferrytu są uznawane za miarę odporności na pękanie gorące spoin o strukturze austenitycznej. W opracowaniu przedstawiono ocenę jakości złącza spawanego rurociągu wykonanego ze stali austenitycznych i austenityczno-ferrytycznych na podstawie zawartości ferrytu delta. Wyniki badań potwierdzają poprawność wykonania połączeń spawanych elementów wykonanych ze stali austenitycznych czy austenityczno-ferrytycznych.

## WŁAŚCIWOŚCI STALI

Austenityczne stale nierdzewne dzięki wysokiej odkształcalności i ciągliwości rzadko wykazują skłonność do pęknięcia zimnego po spawaniu. Jednak niektóre spawane elementy z austenitycznych stali nierdzewnych mogą wykazywać skłonność do pęknięć gorących krystalizacyjnych w spoinie. Przyczyny ich powstawania oraz metody zapobiegania przedstawia rysunek nr 1.

Rys. 1. Przyczyny powstawania pęknięć oraz metody ich zapobiegania [1]



# Część 1

Na skłonność stali austenitycznych do pęknięć krystalizacyjnych największy wpływ mają:

wysoki współczynnik rozszerzalności (1,5 razy większy od stali ferrytycznych),

- rodzaj krystalizującej pierwotnej fazy,

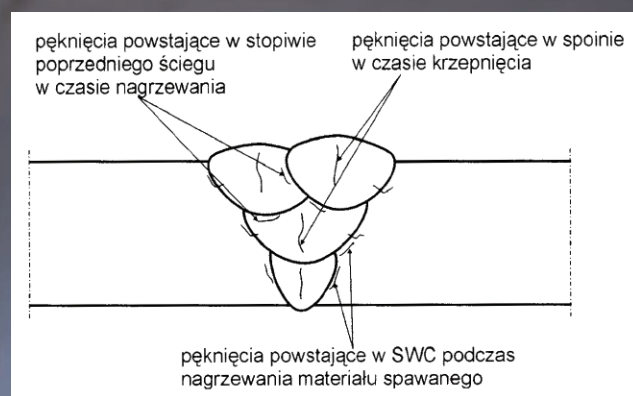
- segregacje domieszek.

Średni współczynnik rozszerzalności cieplnej dla stali ferrytycznych wynosi ok.  $12 \times 10^{-6}$  1/K, natomiast dla stali austenitycznych  $18 \times 10^{-6}$  1/K.

## PĘKANIE SPOIN

W stalach austenitycznych występują znaczne odkształcenia cienkościennych połączeń spawanych lub duże naprężenia w połączeniach grubościennych, znacznie większe niż w stalach niestopowych.

W przypadku połączeń grubościennych istnieje duże niebezpieczeństwo powstawania pęknięć w czasie krzepnięcia spoiny (pęknięcia krystalizacyjne) oraz w czasie ponownego nagrzewania i stygnięcia materiału podstawowego i spoiny (pęknięcia segregacyjne). Ich usytuowanie przedstawia rysunek nr 2.



Rys. 2. Usytuowanie pęknięć w złączach spawanych stali austenitycznych [1]

Charakterystyczną cechą pęknięć krystalizacyjnych jest ich usytuowanie w osi spoiny.

W procesie spawania krystalizujący metal spoiny znajduje się pod wpływem naprężeń rozciągających. Powstają one w wyniku nieswobodnego skurczu spoiny podczas stygnięcia nierównomiernie nagrzanego materiału spawanego. W efekcie tych naprężeń metal spoiny odkształca się, a przy niedostatecznej zdolności do odkształceń

## SKŁAD STALI I SPOIWA

Skłonność stali do pęknięcia na gorąco w dużym stopniu zależy od jej składu chemicznego, a tym samym od sposobu i charakteru krzepnięcia oraz rodzaju pierwotnie krzepnącej fazy, austenit czy ferryt.

Zawartość ferrytu delta ma kluczowe znaczenie dla złączy spawanych stali austenitycznych, które wykazują dużą skłonność do tworzenia pęknięć krystalizacyjnych.

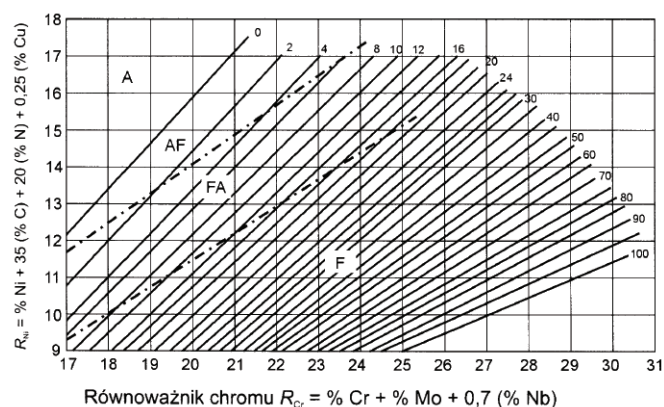
Spoiny austenityczne z pierwotnie wydzielanym austenitem są bardziej skłonne do pęknięć niż spoiny krzepące pierwotnie jako ferrytyczne lub ferrytyczno-austenityczne.

W ostatnich związane jest to z faktem, że zanieczyszczenia, takie jak S, P, Si, Sn, Sb, znacznie rozszerzają zakres temperatur krzepnięcia, mogą w czasie krystalizacji ferrytycznej, ze względu na większą rozpuszczalność w ferrycie, łatwiej się w nim rozpuszczać i tym samym zmniejszać stężenie domieszki na granicach ziaren.

Składniki stopowe, takie jak Ni, Ta, Si, Ti, Nb zwiększają skłonność do pęknięcia, natomiast Cr, W, Mn, Mo, N zmniejszają. Zanieczyszczenia S, P, B, Zr zwiększają skłonność do pęknięcia.

## ETAP WYTWARZANIA STALI

Metalurgicznym środkiem zapobiegającym pękaniu stali austenitycznych jest odpowiedni dobór składu chemicznego stopiwa, taki aby zapewniał powstanie w spoinie od 3 do 15 FN w oparciu o normę [2]. Ilościową zależność pomiędzy składem chemicznym a zawartością ferrytu najdokładniej można wyznaczyć przy pomocy wykresu WRC (Rys. 3).



Rys. 3. Wykres WRC-1992 [1]

## METODYKA I WYNIKI BADAŃ

Proces spawania jest procesem specjalnym w ujęciu norm ISO dotyczących zapewnienia jakości [3, 4]. W ramach nadzoru, przy ocenie zgodności instalacji ze stali austenitycznych, eksperci UDT-CERT sprawdzają parametr (FN), ponieważ w praktyce inżynierskiej RESZTKI FERRYTU są uznawane za miarę ODPORNOŚCI NA PĘKANIE GORĄCE spoin o strukturze austenitycznej.

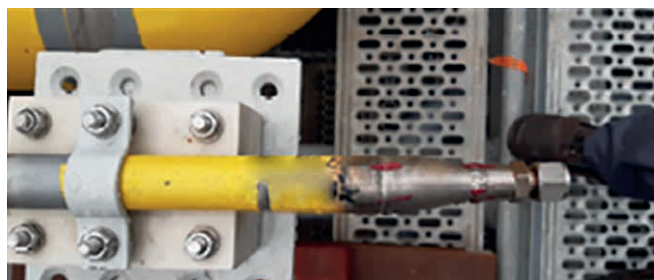
Obecnie takie kontrole są wykonywane przez akredytowane laboratorium UDT nr 001 CLDT Poznań. Podczas oceny rozbudowywanych instalacji przemysłowych i rurociągów, np. w przemyśle paliwowym czy rafineryjnym, uwzględnia się wymagania art. 14.6 a) i b) dyrektywy 2014/68/UE.

Uzyskane wyniki badania przedstawia tabela nr 1. Przykładowe miejsca wykonywania pomiarów przedstawiono na rysunku nr 5. Do pomiarów zastosowano ferrytomierz (Rys. 6).

Tablica 1. Wyniki badania zawartości ferrytu delta

| Nr rurociągu             | XXXX   |      |      |
|--------------------------|--|------|------|
| Nr złącza                | Pozycja na złączu obwodowym/<br>wyniki pomiarów Fe [%] |      |      |
|                          | 0:00   | 3:00 | 6:00 |
| XXXX                     | 5,1  | 4,7  | 5,0  |
|                          | 5,8  | 5,0  | 4,6  |
|                          | 6,0  | 5,3  | 4,3  |
| Wartość śr. Fe [%]       | 5,6  | 5,0  | 4,6  |
| Niepewność rozszerzona U | 0,8  | 0,6  | 0,6  |
| XXXX                     | 4,6  | 4,2  | 4,9  |
|                          | 5,1  | 4,3  | 5,0  |
|                          | 6,2  | 4,5  | 4,8  |
| Wartość śr. Fe [%]       | 5,3  | 4,3  | 4,9  |
| Niepewność rozszerzona U | 1,1  | 0,5  | 0,5  |
| XXXX                     | 5,1  | 4,5  | 4,2  |
|                          | 5,6  | 4,2  | 4,1  |
|                          | 4,3  | 4,3  | 3,7  |
| Wartość śr. Fe [%]       | 5,0  | 4,3  | 4,0  |
| Niepewność rozszerzona U | 0,9  | 0,5  | 0,5  |
| XXXX                     | 4,6  | 4,2  | 4,9  |
|                          | 5,1  | 4,3  | 5,0  |
|                          | 6,2  | 4,5  | 4,8  |
| Wartość śr. Fe [%]       | 5,9  | 5,4  | 5,1  |
| Niepewność rozszerzona U | 1,0  | 0,7  | 0,7  |
| XXXX                     | 3,5  | 5,1  | 5,1  |
|                          | 4,5  | 5,0  | 5,6  |
|                          | 3,8  | 4,6  | 5,6  |
| Wartość śr. Fe [%]       | 3,9  | 4,9  | 5,4  |
| Niepewność rozszerzona U | 0,7  | 0,6  | 0,6  |
| XXXX                     | 5,5  | 4,6  | 4,1  |
|                          | 6,1  | 4,3  | 4,0  |
|                          | 4,1  | 4,7  | 5,6  |
| Wartość śr. Fe [%]       | 5,2  | 4,5  | 4,6  |
| Niepewność rozszerzona U | 1,3  | 0,5  | 1,2  |

Rys. 5. Przykładowe miejsca badań rurociągu



Rys. 6. Przyrząd do badania zawartości ferrytu typ MP30E-S oraz wzorce wtórne %Fe-WRC 1,5/30

Zastosowana metoda pomiaru zawartości ferrytu delta w spoinach oparta jest na zależności pomiędzy siłą magnetyczną a zawartością ferrytu.

Podstawą pomiaru jest wartość siły potrzebnej do oderwania określonego magnesu trwałego od próbki ze stopiwa austenitycznego. Siła przyciągania pomiędzy określonym magnesem trwałym a złączem, w którym występuje ferryt delta, jest mierzona siłomierzem torsyjnym.

Z powodu braku możliwości dokładnego wyznaczenia zawartości ferrytu w austenitycznym stopiwie nierdzewnym jako wartości bezwzględnej, np. w badaniach metalograficznych, które mogą być prowadzone w oparciu o wymagania specyfikacji: ASTM E562 [5] i ASTM E1245 [6], przyjęto magnetyczną metodę pomiarową opartą na standardowych próbkach wzorcowych ferrytu. Metoda ta dostarcza wartości porównawczych (liczba ferrytowa), które niekoniecznie muszą się pokrywać z rzeczywistym udziałem procentowym ferrytu w stopiwie.

#### Zasadę wzorcowania można krótko opisać w kilku punktach.

- Wykonuje się pomiary wartości siły przyciągania, z zastosowaniem magnesu trwałego, na płytkach ze stali węglowej pokrytych niemagnetyczną powłoką miedzianą o różnej grubości.
- Na podstawie uzyskanych wyników badania wykreśla się krzywą kalibracji jako funkcję - Siła odrywania (grubość powłoki niemagnetycznej).
- Następnie zamienia się grubość powłoki niemagnetycznej na liczbę ferrytu FN obliczoną wg następującego wzoru:  $FN = \exp\{1,8059 - 1,11886[\ln(t)] - 0,17740[\ln(t)]^2 - 0,03502[\ln(t)]^3 - 0,00367[\ln(t)]^4\}$ , gdzie  $t$  - grubość powłoki niemagnetycznej.

Do kalibrowania innych przyrządów do pomiaru ferrytu, według wyżej opisanej metody, opracowano wzorce wtórne (*secondary standards*). Zakres wartości FN tych wzorców wynosi od 3 do 28 i jest on wystarczający dla stali austenitycznych z niską zawartością ferrytu delta, ale nie wystarcza dla wyższych zawartości ferrytu, np. dla stali duplex. Dla tych stali wprowadzono rozszerzoną liczbę ferrytu EFN. EFN do wartości 28 są takie same jak FN, a powyżej niej wartości liczbowe EFN odpowiadają wzrostowi liczby ferrytu, aż do struktur czysto ferrytycznych. Zawartości procentowe ferrytu i EFN nie muszą się pokrywać liczbowo. Oznacza to, że struktura czysto ferrytyczna może wykazywać liczbę większą niż 100.

Opisana metoda jest zgodna z normą **PN-EN ISO 8249:2018-11E [7]. Określanie liczby ferrytu (FN) w stopiwie nierdzewnych chromowo-niklowych stali austenitycznych i ferrytyczno-austenitycznych dupleks.** Norma dopuszcza stosowanie innych metod badań zawartości ferrytu niż metoda polegająca na ocenie siły przyciągania, pod warunkiem, że były one kalibrowane za pomocą wzorców wtórnych, których zawartość ferrytu została określona metodą podaną w omawianej normie.

**W praktyce przemysłowej dla określenia zawartości ferrytu delta, wyrażonej jako liczba ferrytu (FN) lub w punktach przeliczeniowych ferrytu (Fe%), z uwagi na łatwość zastosowania stosuje się przyrządy, których zasada oparta jest na metodzie indukcji magnetycznej, w której zawartość ferrytu wyznaczana jest jako funkcja przenikalności magnetycznej.**

Pomiary zawartości ferrytu przeprowadza się dla spoin i warstw platerowanych austenitycznych stali nierdzewnych, stali dupleks oraz austenitycznych stali nierdzewnych.

Należy pamiętać, że pomiary zawartości ferrytu w metalach spoin oraz warstwach platerowanych austenitycznych stali nierdzewnych i stali dupleks oraz martensytu w austenitycznych stalach nierdzewnych można przeprowadzać w zakresie temperatur od +5°C do +45°C i przy wilgotności względnej w zakresie 30 ÷ 90% (bez skraplania).

## PODSUMOWANIE

Uzyskane wyniki badań potwierdzają poprawność wykonania połączeń spawanych ocenianych rurociągów przez Ekspertów UDT-CERT.

#### Dodatnią rolę ferrytu można wyjaśnić w sposób niżej wskazany.

Składniki stopowe i zanieczyszczenia zwiększające skłonność do pęknięcia są zazwyczaj lepiej rozpuszczalne w ferrycie niż w austenicie.

Zalety struktury austenityczno-ferrytycznej z punktu widzenia odporności na pęknięcie wynikają ze zjawisk fizycznych. W wysokiej temperaturze wytrzymałość ferrytu jest znacznie mniejsza niż austenitu. Odształcenie ferrytu powoduje relaksację naprężeń skurczowych, co zapobiega pękaniu.

Ferryt ma niższy współczynnik rozszerzalności cieplnej, co znacznie zmniejsza skurcz.

Struktury austenityczno-ferrytyczne mają ziarno o większej powierzchni właściwej, drobniejsze niż struktury czysto austenityczne, co wpływa na zmniejszenie się możliwości tworzenia ciągłej niskotopliwej błonki cieczy. Obecność błonki niskotopliwej jest z punktu widzenia pęknięcia w wysokich temperaturach szkodliwa tylko wtedy, gdy występuje w niewielkich ilościach.

Dla potwierdzenia pełnego obrazu właściwości złączy spawanych wykonane badania NDT zostaną uzupełnione o badania niszczące na reprezentatywnych próbkach z zastosowanych materiałów podstawowych i dodatkowych do rozbudowy instalacji przemysłowej.

Badania zawartości ferrytu delta w spoinach elementów wykonanych ze stali austenitycznych czy austenityczno-ferrytycznych są prostym i efektywnym środkiem kontroli, pozwalającym na potwierdzanie jakości złączy spawanych.

#### Literatura:

- [1] Tasak E., Metalurgia spawania, Wyd. JAK, Kraków 2008.
- [2] PN-EN 1011-3:2019-01 Wytyczne dotyczące spawania metali. Część 3: Spawanie łukowe stali nierdzewnych.
- [3] PN-EN ISO 9000:2015-10 Systemy zarządzania jakością - Podstawy i terminologia.
- [4] PN-EN ISO 3834-1:2007 Wymagania jakości dotyczące spawania materiałów metalowych Część 1: Kryteria wyboru odpowiedniego poziomu wymagań jakości.
- [5] ASTM E562 Standard test method for determining volume fraction by systematic manual point count.
- [6] ASTM E1245 Standard practice for determining the inclusion or second-phase constituent content of metals by automatic image analysis.
- [7] PN-EN ISO 8249:2018-11 Spawanie - Określanie liczby ferrytu (FN) w stopiwie nierdzewnych chromowo-niklowych stali austenitycznych i ferrytyczno-austenitycznych dupleks.