

# Zakres kruchości wysokotemperaturowej złączy spawanych stopu Inconel 625

Range of high-temperature embrittlement for Inconel 625 welded joint

## Streszczenie

Stopy niklu ze względu na dobre właściwości mechaniczne w wysokich temperaturach, wysoką odporność na pełzanie oraz odporność na utlenianie znalazły zastosowanie m.in. w przemyśle energetycznym i lotniczym. Głównym problemem podczas spawania tych stopów są pęknięcia gorące, które mogą wystąpić zarówno w spoinie jak i strefie wpływu ciepła. Dyskwalifikują one złącze spawane do użytkowania i o ile to możliwe, wymagają naprawy. Za główną przyczynę pęknięcia gorącego uważa się obniżenie plastyczności metalu w zakresie kruchości wysokotemperaturowej (ZKW) oraz odkształcenia złącza spawanego podczas spawania. Szerokość zakresu kruchości wysokotemperaturowej zależy od właściwości materiału oraz warunków spawania, tj. parametrów spawania, geometrii złącza, cyklu cieplnego, kształtu i sztywności konstrukcji.

W pracy wykonano technologiczną próbę transvarestraint, która umożliwiła wyznaczenie zakresu kruchości wysokotemperaturowej stopu Inconel 625 oraz wskaźników odporności materiału na pęknięcie gorące: progę pęknięcia, krytycznej prędkości odkształcenia i krytycznej temperaturowej intensywności odkształcenia. W celu określenia mechanizmu pęknięcia gorącego przeprowadzono badania metalograficzne i fraktograficzne na podstawie których stwierdzono, że pęknięcie gorące przebiega w zakresie temperatur ZKW w wyniku rozerwania cienkiej warstewki cieczy po granicach kryształów narastających w spoinie.

**Słowa kluczowe:** zakres kruchości wysokotemperaturowej, pęknięcie gorące, próba transvarestraint, stop Inconel 625

## Abstract

Nickel alloys, due to their good mechanical properties in elevated temperature, high creep resistance and oxidation resistance, are used in power and aircraft industries. The main difficulty during welding of nickel alloys are hot cracks, which can appear in weld and heat affected zone. Hot cracks cause disqualification of welded joints to using and should be repair if it is possible. The main reason of hot cracks formulation is decrease in metal ductility in high-temperature brittleness range (HTBR) and metal deformation during welding. Width of HTBR depend on material properties and welding condition i.e. welding parameters, joint geometry, thermal cycle, shape and stiffness of weld.

In this paper transvarestraint test was performed. This test allows to determine the width of the range of high-temperature brittleness HTBR, threshold, critical strain speed of the weld CSS and critical temperature strain intensity CST. Metallographic and fractographic research enabled to define mechanism of hot cracking. It was found that hot cracks formulate as a results of disruption of liquid film on crystals boundaries.

**Keywords:** high brittleness temperature range, hot cracking, transvarestraint test, Inconel 625 alloy

## Wstęp

Rosnące wymagania przemysłu energetycznego wynikające z dążenia do uzyskania większych sprawności bloków energetycznych, wymusza stosowanie nowych rozwiązań w zakresie projektowania i budowy kotłów na parametry nadkrytyczne i ultranadkrytyczne. Jednym z kierunków rozwoju jest stosowanie nowych materiałów np. stopów niklu. Charakteryzują się one znaczną wytrzymałością w wysokiej

temperaturze, odpornością na pełzanie i odpornością na utlenianie. Pozwalają na zwiększenie temperatury pracy bloków energetycznych, a tym samym zwiększenie ich sprawności. Stopy niklu są stopami dobrze spawalnymi, jednak są skłonne do pęknięcia gorącego, dlatego podczas spawania należy przestrzegać zaleceń technologicznych. Pęknięcia gorące, mogą wystąpić zarówno w spoinie

Dr inż. Agata Turowska; dr hab. inż. Janusz Adamiec, prof. nzw. PŚI – Politechnika Śląska.

Autor korespondencyjny/Corresponding author: Agata.Turowska@polsl.pl

jak i strefie wpływu ciepła. Dyskwalifikują one poprawność złącza spawanego i nie pozwalają na jego eksploatację. Dlatego istotnym jest ocena i określenie kryteriów skłonności do pęknięcia gorącego stopów niklu podczas spawania [1÷3].

Jedną z metod oceny skłonności materiału do pęknięcia na gorąco jest wyznaczenie zakresu kruchości wysokotemperaturowej (ZKW); im szerszy ZKW tym większa skłonność materiału do powstania pęknięć gorących. Zakres ten można wyznaczyć w próbach technologicznych, które mogą być prowadzone w warunkach, gdy odkształcenie jest regulowane rodzajem konstrukcji, rozmiarami złącza, kolejnością i parametrami układania ściegów (próba kołowa, o zmiennej sztywności ze spoiną czołową, Tekkena, Fisco, Houldcrofta) lub gdy odkształcenie jest wymuszone (próba Transvarestreint, Varestreint) [4].

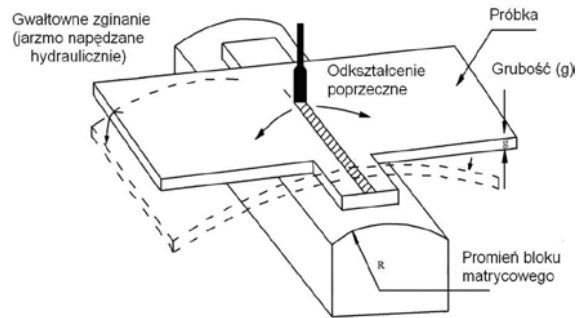
Za górną granicę ZKW uważa się temperaturę utraty wytrzymałości materiału podczas nagrzewania (NST – nil strenght temperature). Jest to temperatura wyznaczana podczas nagrzewania, w której wytrzymałość materiału spada do zera. W jej pobliżu oraz powyżej niej, materiał nie jest w stanie przenosić obciążeń mechanicznych. Dolną granicę ZKW stanowi temperatura odzyskania plastyczności materiału podczas chłodzenia (DRT – ductility recovery temperature). W próbie transvarestreint za dolną granicę ZKW przyjmują się temperaturę końca pęknięcia ( $T_k$ ) [4÷6].

W pracy określono skłonność do pęknięcia gorącego stopu Inconel 625, na podstawie technologicznej próby transvarestreint, która umożliwiła wyznaczenie zakresu kruchości wysokotemperaturowej oraz wskaźników odporności na pęknięcie gorące.

## Materiał do badań i metodyka

Do badań wykorzystano stop niklu Inconel 625 zawierający chrom (>20%), molibden (ok. 10%), żelazo (ok. 5%), niob (ok. 3%) oraz inne pierwiastki w ilości poniżej 3%. W celu oceny skłonności do pęknięcia gorącego spoin ze stopu Inconel 625 przeprowadzono technologiczną próbę transvarestreint. Polega ona na szybkim zginaniu badanych próbek, w trakcie przetapiania, na cylindrycznym bloku matrycowym, tak aby dokładnie odtwarzały jego krzywiznę. Wielkość odkształcenia zależy od grubości zginanej próbki i promienia krzywizny bloku matrycowego.

Próbie transvarestreint przeprowadzono na płytkach o wymiarach: 5x40x60 mm. Próbki były przetapiane metodą TIG, prądem przemiennym o natężeniu 140 A, w osłonie argonu o przepływie 8 l/min. Parametry procesu dobrano tak, aby uzyskać pełne przetopienie. Prędkość przetapiania wynosiła 0,95 mm/s. Podczas przetapiania symulowano odkształcenie na trzpieniach gnących o promieniach krzywizny



Rys. 1. Schemat próby transvarestreint  
Fig. 1. Scheme of transvarestreint test

zny: 17, 38, 55, 85, 110, 135 i 150 mm. Schemat próby przedstawiono na rysunku 1.

Do oceny skłonności do pęknięcia gorącego stopu Inconel 625 koniecznym jest wyznaczenie temperatury utraty wytrzymałości (NST) oraz równania cyklu cieplnego  $T = f(t)$ .

Temperaturę NST wyznaczono na symulatorze Gleeble 3800, nagrzewając próbki z szybkością 20 °C/s do temperatury 1200 °C, a następnie z szybkością 1 °C/s do temperatury zerwania. Temperaturę NST określono na podstawie 5 testów. Równanie cyklu cieplnego określono wykonując symulację rozkładu temperatury w strefie wpływu ciepła i rejestrując zmiany temperatury w czasie w poszczególnych punktach SWC, także na symulatorze Gleeble 3800.

## Wyniki badań i analiza

Uzyskane w próbie transvarestreint wyniki i obliczenia zestawiono w tabelcy I. Wielkość odkształcenia wyznaczono według zależności:

$$\varepsilon = \frac{g}{2R} \cdot 100\%$$

gdzie:  $\varepsilon$  – wielkość odkształcenia (%),  $g$  – grubość zginanej próbki (mm),  $R$  – promień krzywizny bloku matrycowego (mm).

Następnie wyznaczono: długość najdłuższego pęknięcia w osi spoiny, sumę długości wszystkich pęknięć oraz określono próg pęknięcia jako odkształcenie, przy którym nie ujawniono pęknięć gorących. Czas rozwoju pęknięcia obliczono z zależności:

$$t_{max} = \frac{L_{max}}{v_s}$$

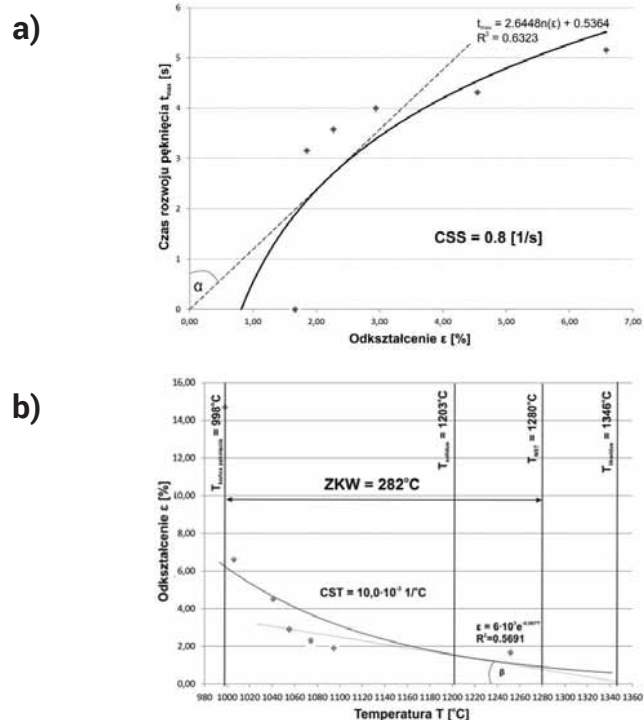
gdzie:  $t_{max}$  – czas rozwoju pęknięcia (s),  $L_{max}$  – najdłuższe pęknięcie (mm),  $v_s$  – prędkość spawania (mm/s).

Tablica I. Wyniki próby transvarestreint dla stopu Inconel 625

Table I. Results of the transvarestreint for Inconel 625 alloy

Lp.	Promień trzpienia R (mm)	Prędkość spawania $v_s$ (mm/s)	Najdłuższe pęknięcie $L_{max}$ , mm	Liczba pęknięć	Suma długości wszystkich pęknięć $\Sigma L_i$ (mm)	Czas rozwoju pęknięcia $t_{max}$ (s)	Wielkość odkształcenia $\varepsilon$ (%)
1	150	0,95	0	0	0	5,37	1,67
2	135	0,95	3	7	11,7	5,16	1,85 ( $\varepsilon_p$ )
3	110	0,95	3,4	10	19,1	4,32	2,27
4	85	0,95	3,8	14	25,5	4	2,94
5	55	0,95	4,1	15	30,9	3,58	4,55
6	38	0,95	4,9	19	40,2	3,16	6,58
7	17	0,95	5,1	21	48,1	0	14,71

Na podstawie uzyskanych w próbie transvarestraint wyników wyznaczono krytyczną temperaturę intensywności odkształcenia (CSS) oraz krytyczną prędkość odkształcenia (CST). Są to wskaźniki stanowiące kryterium pęknięcia gorącego dla stopu Inconel 625 podczas spawania. CSS jest rozumiana jako minimalna temperaturowa intensywność odkształcenia przy której nie powstaje pęknięcie i jest określana jako tangens kąta pomiędzy styczną do krzywej rozwoju pęknięcia a osią odkształcenia (rys. 2a). CST jest określany jako tangens kąta pomiędzy styczną do krzywej odkształcenia a osią temperatury i jest kryterium opisującym minimalną prędkość wymuszonego odkształcenia przy której nie powstaje pęknięcie gorące (rys. 2b). Dla stopu Inconel 625: CSS = 0,8 1/s, CST =  $10 \cdot 10^{-3}$  1/°C. Zakres kruchości wysokotemperaturowej stopu wyznaczono jako różnicę pomiędzy temperaturą utraty plastyczności (NST) a temperaturą końca pęknięcia (Tk). Dla stopu Inconel 625 zakres kruchości wysokotemperaturowej wynosi 282 °C i jest w zakresie temperatury od 998 do 1280 °C (rys. 2b).



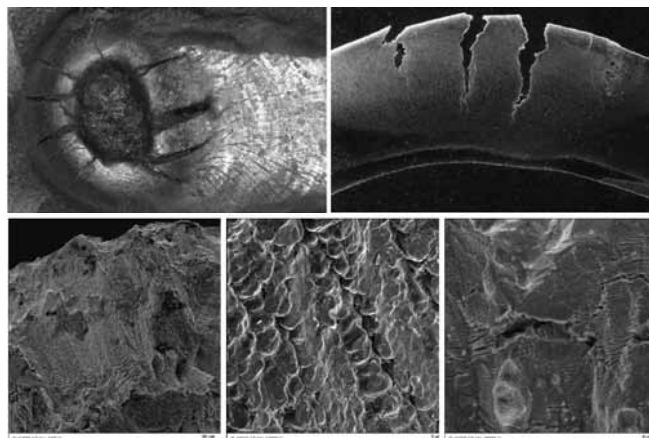
**Rys. 2.** Wyniki próby transvarestraint dla stopu Inconel 625: a) zależność czasu rozwoju pęknięcia w funkcji odkształcenia  $t_{max} = f(\epsilon)$ , b) krzywa plastyczności  $\epsilon = f(T)$   
**Fig. 2.** Results of transvarestraint test for Inconel 625 alloy: a) relation of the time of cracking development  $t_{max} = f(\epsilon)$ , b) plasticity curve  $\epsilon = f(T)$

Próbki po badaniach odporności na pęknięcie gorące w warunkach wymuszonego odkształcenia zostały wykorzystane do badań metalograficznych i fraktograficznych. Przykładowe wyniki obserwacji pokazano na rysunku 3.

Badania mikroskopowe próbek po próbie transvarestraint ujawniły pęknięcia gorące w spoinie i strefie wpływu ciepła. Na rysunku 3a przedstawiono lico przetopienia próbki odkształcanej na bloku o promieniu 38 mm z widocznymi pęknięciami gorącymi inicjowanymi na brzegu jeziorka spawalniczego. Na rysunku 3b przedstawiono makrostrukturę przetopienia z ujawnionymi pęknięciami w spoinie i strefie wpływu ciepła pod powierzchnią metalu i niewidocznymi od strony lica. Pęknięcia te powstają w obszarze stało-ciekłym podczas krystalizacji spoiny.

Na rysunkach 3c,d,e przedstawiono powierzchnię swobodną pęknięcia, na której widoczne są pojedyncze kolumnowe dendryty z ramionami wtórnymi. Wskazuje to na swobodną możliwość ich narastania w cieczy. Brak śladów ciągnięcia na ich powierzchni wskazuje, że podczas powstawania pęknięcia były otoczone ciekłym metalem.

Pęknięcia gorące powstające w ZKW w stopie Inconel 625 charakteryzują się ułożeniem prostopadłym do powierzchni lica spoiny (rys. 3c-e). Pęknięcia te rozwijają się po granicach kryształów austenitu, co potwierdzają również obserwowane na powierzchni pęknięcia ramiona dendrytów spoiny (rys. 3c-e).



**Rys. 3.** Próбка ze stopu Inconel 625 po próbie transvarestraint: a) lico przetopienia, promień gięcia 38mm, b) pęknięcia na przekroju poprzecznym przetopienia, c) pęknięcie gorące, SEM, pow.100x, d) powierzchnia swobodna pęknięcia, SEM, pow.1000x, e) obszar pęknięcia, SEM, pow.2000x  
**Fig. 3.** Sample of Inconel 625 alloy after transvarestraint test: a) faces of weld penetration, bend radius 38mm, b) cracks on cross section of weld penetration, c) hot cracking SEM, magn.100x, d) free surface on crack, SEM, magn.1000x, e) surface of crack area, SEM, magn.2000x

## Podsumowanie

Przeprowadzenie technologicznej próby transvarestraint, tj. próby przetapiania materiału w warunkach wymuszonego odkształcenia pozwoliło na wyznaczenie zakresu kruchości wysokotemperaturowej stopu Inconel 625. Jako kryterium oceny skłonności do pęknięcia gorącego w warunkach wymuszonego odkształcenia przyjęto próg pęknięcia, krytyczną prędkość odkształcenia i krytyczną temperaturę intensywności odkształcenia.

Uzyskane w próbie wyniki pozwoliły na wykreślenie zależności czasu rozwoju pęknięcia w funkcji odkształcenia oraz określenie krytycznej prędkości odkształcenia: CSS=0,8 1/s. Zależność odkształcenia w funkcji temperaturowej pozwoliła na wyznaczenie krytycznej temperaturowej intensywności odkształcenia: CST =  $10,0 \cdot 10^{-3}$  1/°C. Są to wielkości, po których przekroczeniu stop Inconel 625 będzie pękać na gorąco w procesie spawania. Na podstawie zależności  $\epsilon=f(T)$  wyznaczono zakres kruchości wysokotemperaturowej stopu Inconel 625 w warunkach wymuszonego odkształcenia. Wynosi on 280 °C i mieści się w zakresie temperatur 998-1280 °C.

Uzyskane wyniki wskazują, że wraz ze wzrostem odkształcenia wzrasta liczba pęknięć oraz ich sumaryczna długość. Pojawiające się pęknięcia mają charakter krystalizacyjny. Przebiegają po granicach krystalitów, gdzie podczas stygnięcia pomiędzy wzrastającymi krystalitami znajdował się jeszcze ciekły metal. Analiza struktury powierzchni przełomu pęknięć gorących nadstopów niklu, które powstały w warunkach wymuszonego odkształcenia wskazuje, że pękanie następuje w wyniku rozerwania się warstewki cieczy na granicach krystalizujących kryształów austenitu.

Na tej podstawie stwierdzono, że w celu uniknięcia pęknięcia gorącego elementów spawanych ze stopu niklu Inconel 625 należy spawać z możliwie małymi odkształceniami (próg pęknięcia jest poniżej 1,67%), podczas procesu nie przekraczać wartości krytycznej CSS, spawać małą energią liniową łuku, oraz unikać intensywności odkształcenia w wyniku oddziaływania temperatury tak aby utrzymać CST poniżej wartości  $10,0 \cdot 10^{-3} 1/^{\circ}\text{C}$ .

*Praca sfinansowana w ramach Programu Badań Stosowanych finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju, projekt pt.: „Technologia spawania laserem rur ożebrowanych ze stali austenitycznych i stopów niklu przeznaczonych do pracy w kotłach o parametrach nadkrytycznych i ultranadkrytycznych.”, nr umowy PBS1/A5/13/2012*

## Literatura

- [1] Huseman R.: Advanced (700oC) PF Power Plant. A Clean Coal European, Technology. Advanced Material for AD700 Boilers, Cesi Auditorium, Milano, 2005.
- [2] Adamiec J., Piliszko B.: Wysokotemperaturowa korozja elementów kotłów przemysłowych napawanych stopami niklu, Inżynieria Materiałowa, nr 6, 2007, s. 907-913.
- [3] Adamiec J., Więcek M., Kokot G.: Technologia spawania laserowego rur ożebrowanych., Przegląd Spawalnictwa 5/2014, p.3-9.
- [4] Tasak E. Metalurgia spawania. Wydawnictwo JAK, Kraków 2008.
- [5] Gleeble 3800 Applications, Welding Process Simulation 2000.
- [6] Adamiec P., Dziubiński J., Gruszczak A., Makosz P., Mazur M., Mazur W., Szymański A.: Metalurgia spawania. Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice, 1992, Skrypty uczelniane nr 1679.