

# Właściwości mechaniczne złączy spawanych ze stali Sanicro 25 oraz stopu HR6W

## Mechanical properties of Sanicro 25 steel and HR6W alloy welded joints

### Streszczenie

Materiały wykorzystywane w energetyce muszą spełniać określone wymagania, do których należy zaliczyć przede wszystkim wysoką wytrzymałość na pełzanie i zmęczenie, żaroodporność w środowisku spalin i odporność na utlenianie w parze wodnej, odpowiednią ciągliwość oraz stabilność mikrostruktury podczas długotrwałej eksploatacji. W przemyśle energetycznym, w zależności od przeznaczenia danego elementu, stosuje się różne gatunki stali i stopów. Przedmiotem badań była ocena właściwości mechanicznych jednorodnych i niejednorodnych złączy spawanych ze stali Sanicro 25 oraz stopu HR6W przeznaczonych do zastosowania na węzownice przegrzewaczy pary w nowoczesnych blokach energetycznych. Przeprowadzono statyczną próbę rozciągania w temperaturze pokojowej oraz podwyższonej (700°C i 750°C) i próby udarnościowe w temperaturze pokojowej. Badano wytrzymałość na pełzanie złączy spawanych w podwyższonej temperaturze (700°C) oraz rozkład twardości po długotrwałym wyżarzaniu w temperaturze 700°C.

### Abstract

The materials used in the power industry must meet certain requirements, which include primarily high resistance to creep and fatigue, heat resistance in an exhaust gas and oxidation resistance in water vapour, adequate ductility and microstructural stability during long-term use. In the energy industry, depending on the purpose of the element are various types of steels and alloys. Subject of research was to evaluate the mechanical properties of homogeneous and heterogeneous welded joints in Sanicro 25 steel and HR6W alloy designed for use on steam superheater coils in modern its energy units. Static tensile test was carried out at room and elevated temperatures (700°C and 750°C) and the impact tests at room temperature. Investigated creep strength of welded joints at elevated temperatures (700°C) and hardness distribution after prolonged an annealing at 700°C

### Wstęp

W świetle europejskich uwarunkowań prawnych, krajowych zasobów węgla brunatnego i kamiennego, dekapitalizacji licznych bloków, a także bezpieczeństwa energetycznego kraju, realne kierunki rozwoju polskiej elektroenergetyki w okresie najbliższych 10 lat to: modernizacja starych i budowa nowoczesnych bloków energetycznych o parametrach pary – temperatury i ciśnienia – znacznie wyższych od 540°C i 18 MPa zapewniających sprawność powyżej 40% netto [1, 2].

**Mgr inż. Przemysław Jamrozik, dr hab. inż. Maria Sozańska** – Politechnika Śląska, Katowice, **dr inż. Jerzy Pasternak** – Rafako, Racibórz.

W części kotłowej bloku energetycznego kluczowymi elementami konstrukcyjnymi są:

- ściany szczelne (membranowe) komory paleniskowej wykonane z cienkościennych rurek,
- nieogrzewane spalinami grubościennymi rury pary świeżej i komory,
- ogrzewane spalinami węzownice przegrzewaczy pary świeżej i przegrzewaczy w części wtórnej.

Termin *parametry nadkrytyczne* odnosi się do bloków energetycznych eksploatowanych w warunkach pary o temperaturze 565÷620°C i ciśnieniu do 30 MPa oraz docelowo ultranadkrytycznych (USC), tj. 650÷720°C/30÷35 MPa o sprawności 45÷50% netto. Realizowany projekt SP/E1/67484/10 obejmuje m.in. projekt kotła 50+ na parametry pary 650°C [3].

## Charakterystyka badanych materiałów

Sanicro 25 (X7NiCrWCuCoNbNB25–23–3–3–2) to wysokostopowa stal austenityczna zaprojektowana dla nowej generacji kotłów energetycznych na parametry pracy nadkrytyczne i ultranadkrytyczne. Jest stosowana na elementy konstrukcyjne pracujące w temperaturze do 700÷750°C. Stal Sanicro 25 charakteryzuje się bardzo wysoką wytrzymałością na pełzanie, stabilnością mikrostruktury w podwyższonej temperaturze, wysoką odpornością na utlenianie w parze wodnej oraz żaroodpornością w spalinach. Wysoka zawartość chromu zapewnia jej dużą odporność na utlenianie w atmosferze pary oraz odporność na *hot corrosion*.

Stop HR6W (23Cr–45Ni–7W) został opracowany w Japonii pod koniec lat 80. jako materiał do produkcji wysokowytrzymałych rur do budowy kotłów USC o temperaturze pary powyżej 650°C. Wytrzymałość na pełzanie oraz stabilność mikrostruktury w podwyższonej temperaturze stopu HR6W jest porównywalna z nadstopem niklu Alloy617 i jest efektem silnego umocnienia rozтворowego w wyniku dodatku wolframu i azotu oraz umocnienia wydzieleniowego wskutek powstawania faz Lavesa, węglików  $M_{23}C_6$  oraz azotków NbCrN. Wysoka zawartość chromu zapewnia dużą odporność na utlenianie w atmosferze pary oraz odporność na *hot corrosion* [4].

Materiały te z punktu widzenia zarówno technologicznego, jak i długotrwałej eksploatacji w wysokiej temperaturze nie są w pełni poznane. Realizacja projektu ma charakter wyprzedzający, pozwalający na zdobycie odpowiedniej wiedzy i własnego technologicznego *know-how* pod kątem planowanej w kraju budowy nowoczesnych bloków nadkrytycznych. Zwiększenie temperatury pracy kotłów energetycznych, przy jednoczesnym stosowaniu materiałów o wysokiej odporności na pełzanie, pozwala zwiększyć wydajność produkcji energii oraz obniżyć poziom emisji CO<sub>2</sub> do atmosfery. Rozwój technologii energetycznych jest możliwy jedynie wraz z rozwojem materiałów i technologii spawania spełniających podwyższone wymagania odpowiednich właściwości użytkowych [5].

Materiał do badań stanowiły rury  $\varnothing 45 \times 8,8$  mm spawane ręcznie 141 GTAW oraz automatycznie 141 Aut na wężownicy przegrzewaczy pary. Realizowane badania mają na celu dobór metody i parametrów spawania oraz opracowanie charakterystyk właściwości mechanicznych badanych materiałów w podwyższonej temperaturze do zastosowania w nowoczesnych blokach energetycznych. Skład chemiczny stali Sanicro 25 oraz stopu HR6W przedstawiono w tabelicy I.

## Technologia spawania

Próby spawania wykonano w dwóch etapach. W I etapie badań spawalności wykonano eksperymentalne złącza doczołowe spawane automatycznie oraz ręcznie, natomiast w II etapie skorygowano warunki spawania z uwagi na nie w pełni zadowalającą jakość złączy wykonanych wcześniej. Eksperymentalne złącza wykonano metodą spawania 141 Aut oraz metodą spawania ręcznego 141 GTAW. Przebieg spawania metodą 141Aut rur ze stopu HR6W i stali Sanicro 25 z charakterystycznymi elementami oraz kolejność układania ściągów przedstawiono na rysunku 1.

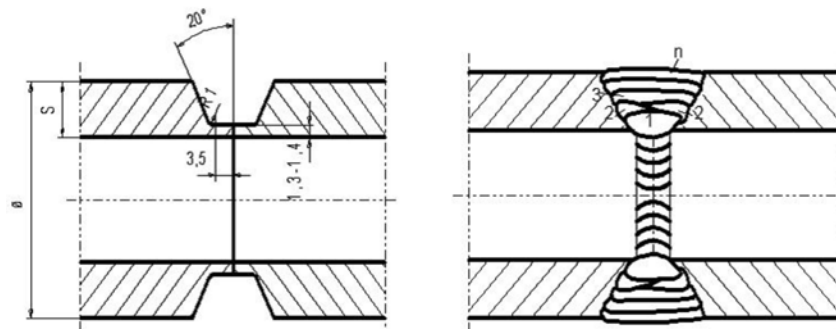
Spawanie metodą 141 Aut przeprowadzono w osłonie Argonu 1, na automacie spawalniczym firmy Polysoude typ PS406. Stanowisko spawalnicze zapewnia obrót spawanej rury – pozycja spawania PA/PG. Spawanie wykonano z zastosowaniem drutu Thermanit 617 o średnicy 0,8 mm. Średnie natężenie prądu spawania wynosiło 110 A. Liczba przejść, ściągów – do 8. Maksymalna temperatura międzyściągowa nie przekraczała 140°C [7].

Kolejne badanie technologii spawania obejmowało metodę 141 GTAW. Spawanie wykonano w osłonie Argonu 1, z zastosowaniem drutu Thermanit 617 o średnicy 2,0 mm, ręcznie w pozycjach PC i PF, zgodnie z rysunkiem 2. Średnie natężenie prądu dla warstwy graniowej wynosiło 120 A, dla warstw wypełniających 130 A. Liczba przejść, ściągów: 3, 4. Maksymalna temperatura międzyściągowa nie przekraczała 140°C.

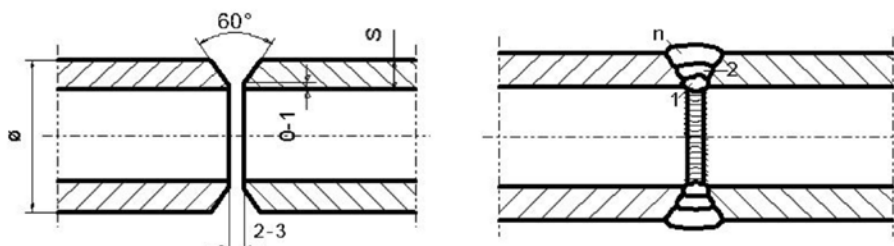
Tablica I. Nominalny skład chemiczny badanych materiałów % mas [6]

Table I. Nominal chemical composition, mass %.

Gatunek	Nominalny skład chemiczny, % mas.												
	C	Cr	Ni	W	Mn	Co	Cu	Nb	Si	Ti	N	S <sup>1</sup> /P <sup>2</sup>	Fe
Sanicro 25	0,1	22,5	25,0	3,6	0,5	1,5	3,0	0,5	0,2	–	0,23	0,01 <sup>1</sup>	reszta
HR6W	0,1	23,5	45,0	7,0	1,5	–	–	0,35	1,0	0,2	–	0,015 <sup>1</sup> /0,03 <sup>2</sup>	reszta



**Rys. 1.** Przygotowanie elementów do spawania oraz kolejność spawania dla metody 141 Aut  
**Fig. 1.** Preparation of components for welding and welding sequence for the 141 Aut method.



**Rys. 2.** Przygotowanie elementów do spawania oraz sekwencja spawania dla metody 141 GTAW  
**Fig. 2.** Preparation of components for welding, and welding sequence for the 141 GTAW method.

## Badania mikrostruktury eksperymentalnych złączy spawanych

### Stop HR6W

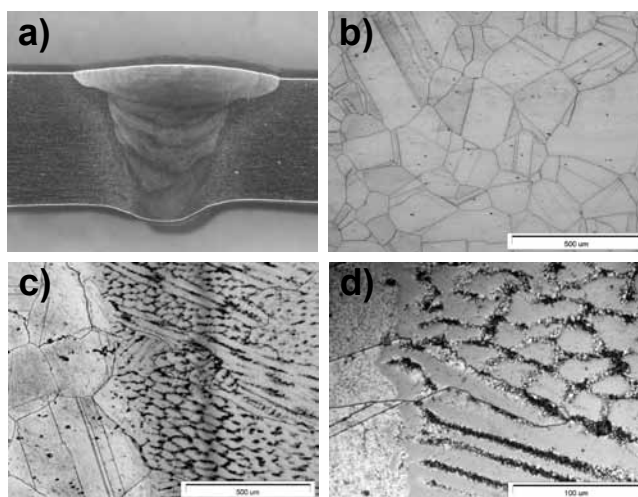
Badania metalograficzne zostały przygotowane i wykonane wg EN 1321. Próbki wytrawiono po jednej stronie, tak by wyraźnie była widoczna linia wtopienia (SWC) z ułożeniem ściegów. Badania mikroskopowe obejmowały materiał podstawowy, SWC oraz spoinę. Charakterystyczne obrazy struktur przedstawiono na rysunku 3.

Na podstawie wyników badań pierwszej serii złączy dokonano drobnych, ale istotnych modyfikacji technologicznych związanych z przygotowaniem rur przez ponowne przesycanie i korektę warunków spawania (opisane w akapicie Technologia spawania). Druga seria złączy spawanych ręcznie oraz automatycznie zapewniła w pełni zadowalającą jakość złączy oraz ich makro- i mikrostrukturę. Charakterystyczne obrazy struktury złącza przedstawiono na rysunku 3.

### Stal Sanicro 25

Wysoka zawartość chromu i wolframu sprzyja tworzeniu się fazy  $\delta$  w strukturze stopu. Z tego powodu zawartość niklu została zwiększona do 25% wag. wraz z dość dużą zawartością azotu. Z tych samych powodów zawartość molibdenu i krzemu powinna być stosunkowo niska.

Badania mikroskopowe prowadzono przy użyciu mikroskopu świetlnego (LM) oraz skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM). Obserwacje wykazały, że



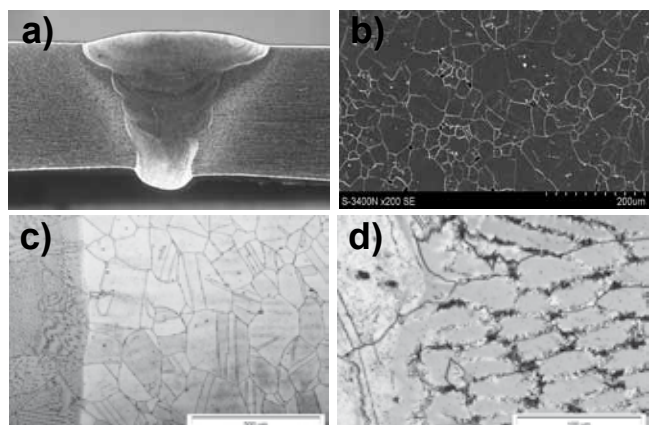
**Rys. 3.** Struktura złącza spawanego ze stopu HR6W: a) makrostruktura złącza spawanego ze stopu HR6W, b) mikrostruktura MR. Austenit z licznymi wydzieleniami faz wtórnych, pow. 100x, c) mikrostruktura w strefie wtopienia, pow. 500x, d) mikrostruktura spoiny z siatką wydzieleni na granicach dendrytów, pow. 500x

**Fig. 3.** The macro- and microstructure of welded joint HR6W alloy: a) weld macrostructure, b) BM microstructure with visible austenite grains with numerous precipitates of secondary phases, c) microstructure of the fusion zone HAZ, d) microstructure of the weld mesh precipitates the limits of dendrites

próbki w stanie początkowym (bez obróbki) zawierają wydzielenia bogate w niob, dodatkowo wzbogacone chromem. W mikrostrukturze próbek starzonych stwierdzono niewielkie iglaste wydzielenia  $M_{23}C_6$ , zarówno wewnątrz ziaren, jak i na ich granicach. Nie stwierdzono występowania fazy  $\delta$  i  $Cr_3N$  w próbkach starzonych przez 1 i 3 tys. h.

Badania metalograficzne przygotowano i wykonano zgodnie z EN 1321 a próbki wytrawiono po jednej

stronie tak, by wyraźnie była widoczna linia wtopienia (SWC) z ułożeniem ściągów. Badania mikroskopowe obejmowały materiał podstawowy, SWC oraz spoinę. Charakterystyczne obrazy struktur przedstawiono na rysunku 4.



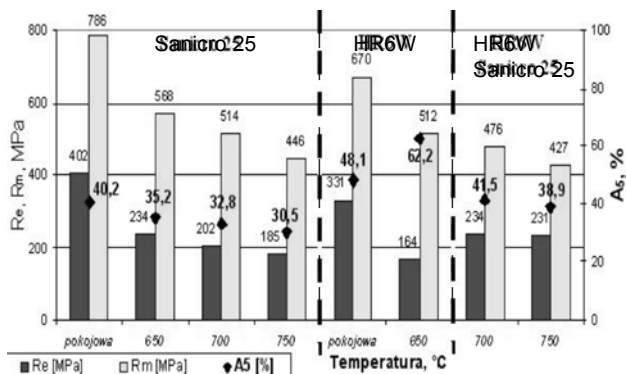
**Rys. 4.** Struktura złącza spawanego ze stali Sanicro 25: a) makrostruktura złącza spawanego ze stali Sanicro 25, b) mikrostruktura MR. Austenit z wydzieleniami faz wtórnych, pow. 200x, c) mikrostruktura SWC, widoczna jednorodna strefa wtopienia, pow. 100x, d) mikrostruktura spoiny z siatką wydzieleni na granicach dendrytów, pow. 500x

**Fig. 4.** The macro- and microstructure of welded joint Sanicro 25 steel a) weld macrostructure. b) microstructure PR showing visible austenite grains with numerous precipitates of secondary phases. c) microstructure of the fusion HAZ. d) microstructure of the weld mesh precipitates the limits of dendrites

## Podstawowe właściwości mechaniczne

### Wytrzymałość na rozciąganie

Wytrzymałość na rozciąganie została wyznaczona w statycznej próbie rozciągania dla materiałów podstawowych (stal Sanicro 25 oraz stop HR6W) oraz eksperymentalnych złączy spawanych w temperaturze pokojowej oraz podwyższonej (700°C i 750°C) zgodnie z EN 895 oraz EN-PN 15614-1. Wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie dla jednorodnych oraz



**Rys. 5.** Wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie jednorodnych i niejednorodnych złączy spawanych ze stali Sanicro 25 oraz stopu HR6W

**Fig. 5.** The results of tensile tests of homogeneous and heterogeneous welded joints in Sanicro 25 steel and HR6W alloy.

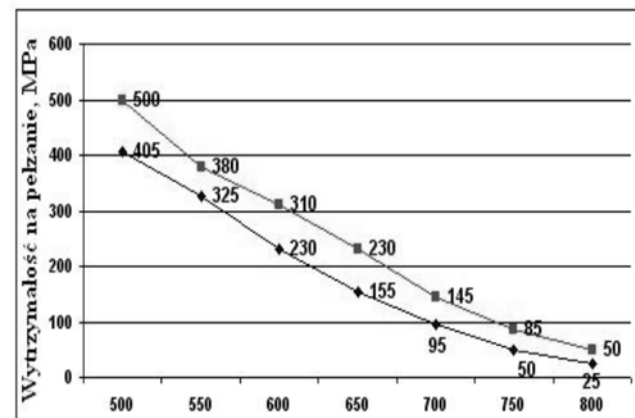
niejednorodnych złączy spawanych Sanicro 25 + HR6W w temperaturze pokojowej i podwyższonej przedstawiono na rysunku 5. Przełom zaobserwowano po stronie HR6W w przypadku złączy niejednorodnych. W przypadku złączy jednorodnych przełom wystąpił poza spoiną.

### Wytrzymałość na pełzanie

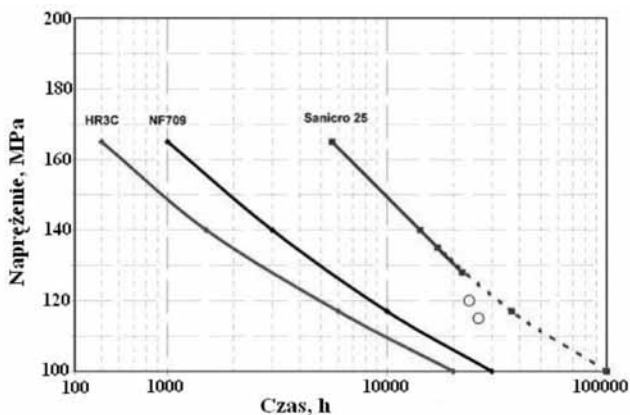
Wymagania stawiane elementom kotłów energetycznych w elektrowniach węglowych dotyczą takich właściwości, jak odporność na pełzanie, utlenianie, dobra stabilność mikrostruktury oraz łatwość przeróbki [8].

Celem jest osiągnięcie wytrzymałości na pełzanie na poziomie 100 MPa w 700°C dla czasu 100 tys. h. Dane literaturowe na temat przeprowadzonych testów na pełzanie w temperaturze 650°C i 700°C z czasami do zerwania próbki wynoszącymi do 70 tys. h wskazują na możliwość spełnienia kryteriów dotyczących wytrzymałości na pełzanie dla założonego czasu zerwania próbki 100 tys. h dla stali Sanicro 25 (rys. 6). Korzystając z wyników prób trwających ponad 5 tys. h, wytrzymałość na pełzanie dla materiału w kształcie rury określono na poziomie 70÷100 tys. h dla 100 MPa w temperaturze 700°C. Dane te świadczą o wyższej wytrzymałości na pełzanie stali Sanicro 25 niż innych stosowanych w energetyce stopów (rys. 7). Rysunek 8 obrazuje dane literaturowe dotyczące wytrzymałości na pełzanie stopu HR6W w zakresie temperatury 650÷800°C [9].

Próby pełzania wykonano na elektromechanicznej pełzarce Zwick/Roell typ Kappa 50DS. Badania realizowano przy stałym obciążeniu próbki. Prędkość nagrzewania wynosiła 5°C/min, a odchylenie od zadanej wartości  $\pm 3^\circ\text{C}$ . Pomiar odkształcenia podczas testu prowadzono za pomocą ekstensometru pierwszej klasy dokładności. Parametry próby pełzania (siłę, czas, temperaturę, wydłużenie) rejestrowano za pomocą programu Test X'Pert 2. Badaniom poddano próbki o średnicy 4 mm i dziesięciokrotnej bazie pomiarowej. W tabelicy II przedstawiono wyniki badań wytrzymałości na pełzanie złączy niejednorodnych Sanicro 25 + HR6W. Na rysunku 9 pokazano krzywe pełzania dla złączy niejednorodnych ze stali Sanicro 25 + HR6W w zależności od przyłożonego naprężenia w temperaturze 700°C.

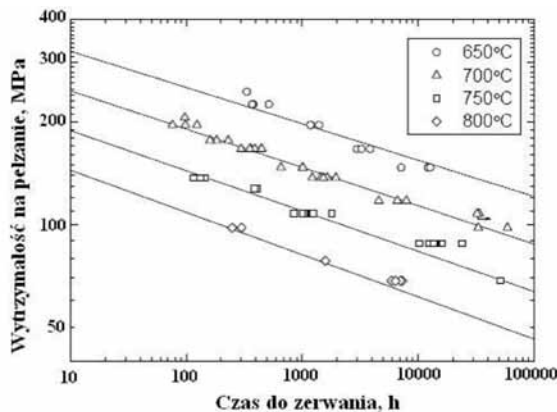


**Rys. 6.** Wytrzymałość na pełzanie stali Sanicro 25 po 10 i 100 tys. h [10]  
**Fig. 6.** Creep strength of Sanicro 25 steel after 10, 000 and 100, 000 hr.



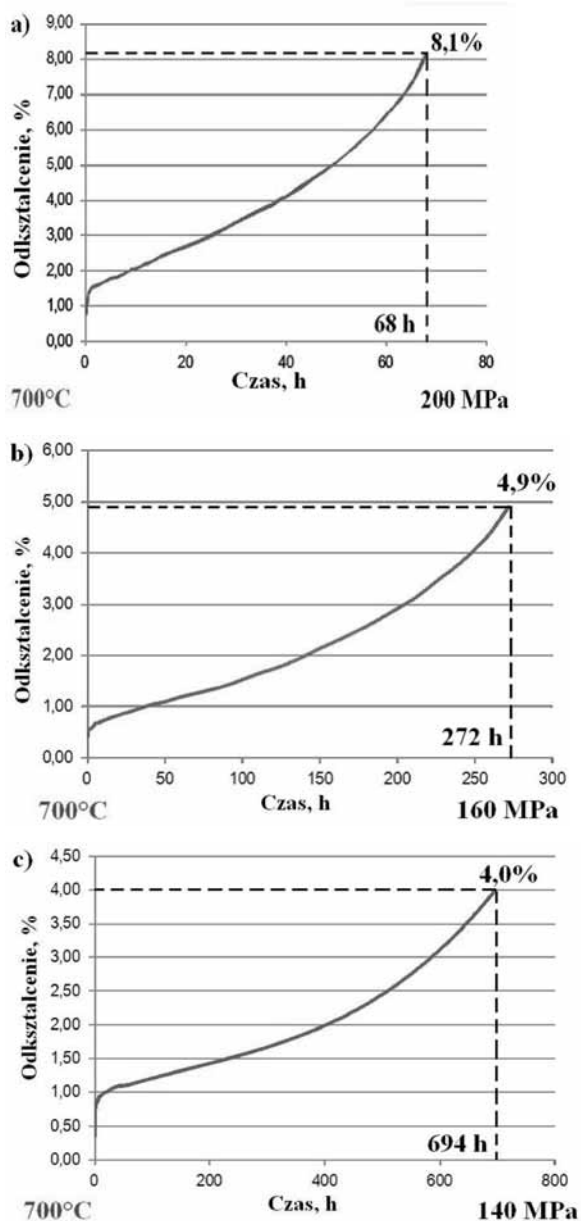
Rys. 7. Wytrzymałość na pełzanie wybranych stopów żarowytrzymałych [11]

Fig. 7. Creep strength of selected high temperature alloys



Rys. 8. Wytrzymałość na pełzanie stopu HR6W w temperaturze 650-800°C [12]

Fig. 8. Creep strength HR6W alloy at a temperature of 650-800°C.



Rys. 9. Krzywe pełzania w temperaturze 700°C przy naprężeniu a) 200 MPa, b) 160 MPa, c) 140 MPa

Fig. 9. Creep curves at a temperature of 700°C at a stress of a) 200 MPa, b) 160 MPa, c) 140 MPa

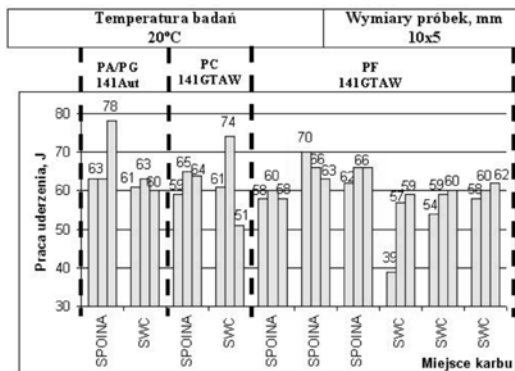
Tablica II. Odkształcenie i prędkość pełzania ustalonego próbek w temperaturze 700°C przy naprężeniach: a) 200 MPa, b) 160 MPa, c) 140 MPa

Table II. Deformation and creep speed fixed specimens at a temperature of 700°C at a stress of a) 200 MPa, b) 160 MPa, c) 140 MPa

Naprężenie, MPa	200	160	140
Temperatura, °C	700	700	700
Czas trwania testu, h	68	272	694
Odkształcenie początkowe $\epsilon_p$ , %	0,75	0,42	0,36
Odkształcenie całkowite $\epsilon$ , %	8,1	4,9	4,0
Prędkość pełzania $d\epsilon/dt$ , 1/s	$1,9 \cdot 10^{-7}$	$2,6 \cdot 10^{-8}$	$6,8 \cdot 10^{-9}$
Uwagi	do zerwania	do zerwania	do zerwania

### Udarność

Próbki do badania udarności zostały wykonane wg EN 875. Stosowano próbki z karbem typu Charpy V naciętym w spoinie oraz strefie wpływu ciepła (SWC). Energia łamania próbek powinna być zgodna z wartościami norm dla materiału podstawowego [13]. Badania udarności prowadzono w temperaturze pokojowej. Na rysunku 10 przedstawiono wyniki badań udarności dla złączy spawanych ze stali Sanicro 25.



Rys. 10. Wyniki badań udarności dla jednorodnych złączy spawanych ze stali Sanicro 25

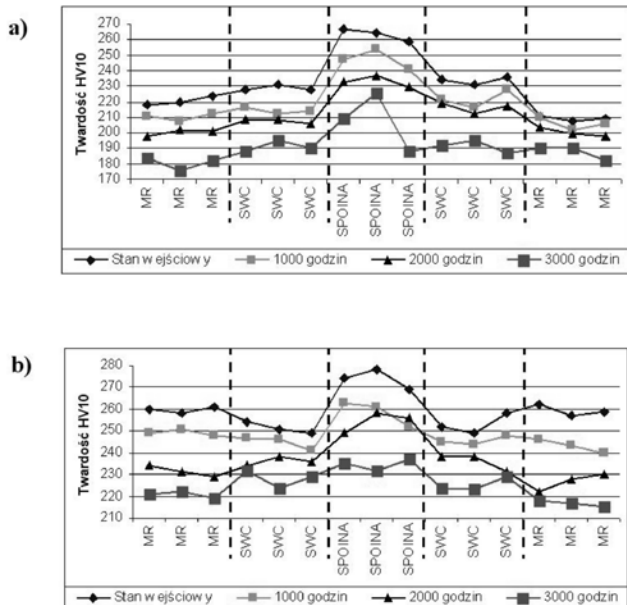
Fig. 10. Results of impact for homogeneous of welded joints in Sanicro 25 steel.

## Rozkład twardości

Badania twardości wykonano metodą Vickersa z obciążeniem 10 kG, zgodnie z EN 1043-1. Twardość mierzono w spoinie, SWC i materiale podstawowym, w celu określenia rozkładu twardości przez złącze spawane. Każdy rząd odcisków zawierał przynajmniej 3 pomiary, w każdym z badanych obszarów. Badania twardości przeprowadzono w stanie wyjściowym oraz po długotrwałym wyżarzaniu w temperaturze 700°C po 1 tys., 2 tys. oraz 3 tys. h. Schemat przygotowania próbek do badań twardości przedstawiono na rysunku 11. Wyniki badań rozkładu twardości złączy spawanych ze stali Sanicro 25 oraz stopu HR6W pokazano na rysunku 12.



Rys. 11. Schemat wyboru miejsc do badania rozkładu twardości  
Fig. 11. Schematic of hardness test.



Rys. 12. Rozkład twardości MR – SWC – Spoina – SWC – MR w temperaturze 750°C: a) stopu HR6W, b) stali Sanicro 25  
Fig. 12. Distribution of hardness PR – HAZ – WELD – HAZ – PR at a temperature of 750°C in a) Sanicro 25 steel b) HR6W alloy

## Podsumowanie

Celem badań materiałowych była analiza zastosowanych parametrów technologicznych pozwalających na opracowanie technologii wytwarzania węzownic przegrzewaczy pary w warunkach obowiązujących dużego wytwórcę elementów konstrukcyjnych dla kotła na parametry supernadkrytyczne.

Właściwości mechaniczne określone w statycznej próbie rozciągania oraz pracy łamania, które były podstawą kwalifikacji technologii spawania badanych materiałów, zostały zaprezentowane w artykule. Wszystkie próbki pękały poza spoiną, a praca łamania złącza mieściła się w granicach od 40 do 80 J, zależnie od metody spawania oraz materiału i jego mikrostruktury. Uzyskane wysokie właściwości potwierdzają poprawną jakość złącza. W temperaturze 700 i 750°C próbki pękały w materiale rodzimym po stronie HR6W. Ponadto zmierzone twardości złączy mieściły się zależnie od rodzaju materiału i jego mikrostruktury w następujących zakresach: spoiny od 210 do 280 HV10, SWC od 190 do 250 HV10, a materiał rodzimy od 170 do 220 HV10.

Zastosowane technologie oraz działania doskonalące wykonanie złączy jednorodnych z rur przegrzewaczowych  $\varnothing 45 \times 8,8$  mm ze stopu HR6W oraz stali Sanicro 25 zapewniły prawidłową makro- i mikrostrukturę spoiny, strefy wpływu ciepła oraz linii wtopienia oraz wymagane podstawowe właściwości użytkowe. Dokonano oceny jakości złączy i podstawowych właściwości mechanicznych i technologicznych. Prowadzone badania są pionierskie w kraju

i pozwalają na zdobycie doświadczenia i własnego *know-how* w zakresie technologii spawania nowych materiałów do zastosowań w kotłach na parametry supernadkrytyczne. Na podstawie wykonanych badań nieniszczących złączy jednorodnych oraz materiałowych badań niszczących sformułowano następujące wnioski:

- Opracowano charakterystykę materiałów podstawowych oraz złączy eksperymentalnych. Dokonano oceny jakości złączy, ich struktury oraz podstawowych właściwości mechanicznych. Działania doskonalące jakość wykonywanych złączy pozwoliły na uzyskanie kwalifikacji spawania przeprowadzonej wg PN-EN 15614 przez jednostkę notyfikującą TÜV Nord w zakresie oceny właściwości mechanicznych oraz struktury złączy. Złącza spełniają wymagania klasy B wg PN-EN 5817.
- Badania wytrzymałości na pełzanie pozwalają prognozować, że stal Sanicro 25 można stosować na elementy konstrukcyjne kotłów energetycznych o nadkrytycznych parametrach pracy zakładane 100 MPa dla czasów zerwania 10 tys. oraz 100 tys. h w temperaturze pracy 700°C jest spełnione.
- Stal Sanicro 25 oraz stop HR6W mogą być stosowane do temperatury 700°C w kotłach energetycznych, zachowując stabilność mikrostruktury, wytrzymałość na pełzanie oraz odporność na korozję wysokotemperaturową; powyżej tej temperatury należy stosować nadstop na bazie niklu.

## Literatura

- [1] Hernas A., Tasak E., Sozańska M., Pasternak J., Szczucka-Lasota B., Fudali S., Krupa R.: Zaawansowane technologie pozyskiwania energii, Zadanie 1. Opracowanie charakterystyk właściwości technologicznych i użytkowych, Etap nr 17.IV.2.2 Badania materiałowe, Politechnika Śląska.
- [2] Hernas A.: Zarowyttrzymałość stali i stopów, Wyd. Pol. Śląskiej, Gliwice 2000.
- [3] Hernas A., Fudali S., Pasternak J.: Dobór materiałów na elementy referencyjnego kotła o supernadkrytycznych parametrach pary, Energetyka Zeszyt tematyczny nr XXII, listopad, 2011.
- [4] Hernas A., Moskal G., Pasternak J.: Stale austenityczne i nadstopy niklu stosowane w budowie kotłów nadkrytycznych, Wyd. SITPH, Katowice, 2009.
- [5] Hernas A., Wala T.: Dobór materiałów na przegrzewacze o podwyższonych parametrach pary, Wyd. SITPH, Katowice, 2009.
- [6] Semba H., Okada H., Yonemura M., Igrashaki M.: Creep Properties and Microstructure of HR6W and Ni-base Superalloys for Advanced USC Boilers.
- [7] Chi Sh., Zhan Z., Xu Y., Li J., Xiao X., Zhu Ch.: Improvement of Stress-rupture Life for Modified-HR6W Austenitic Stainless Steel.
- [8] Michael S. G., Horst H., Stanko G.: Fireside corrosion resistance of proposed USC superheater and reheater materials: Laboratory and field test results.
- [9] Holcom G. R., Alman D. E., Bullard S. B., Covino Jr. B. S.: Ultra-supercritical steam corrosion.
- [10] Pasternak J., Fudali S., Hernas A.: Właściwości technologiczne stali Sanicro25 oraz HR6W, Materiały konferencyjne, 14-15.03.2013, Słok k. Bełchatowa.
- [11] Narumanchi K.: Sandvic Sanicro 25- New heat resistant steel for a USC.
- [12] Rautio R., Bruce S.: Alloy for ultracupercritical coal fired boilers, Advanced Materials and Processes, April 2008, ASM International.
- [13] Matsuda J., Kukoski A., Gaffoor A.: Material aspects of a 700°C – Power plant.

## Podziękowanie

Badania zostały wykonane w ramach projektu współfinansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach Strategicznego Programu Badawczego, umowa SP/E1/67484/10: Zaawansowane technologie pozyskiwania energii: Opracowanie technologii dla wysokosprawnych „zero-emisyjnych” bloków węglowych zintegrowanych z wychwytem CO<sub>2</sub> ze spalin.

 4METAL.PL

Ponad 2000 podwykonawców z całego świata

[katalog firm] PONAD 2000 FIRM Z CAŁEGO ŚWIATA  
PODZIELONYCH NA KATEGORIE

[giełda pracy] OGŁOSZENIA PRACOWNIKÓW  
I PRACODAWCÓW Z BRANŻY

NEW

[giełda materiałów] OGŁOSZENIA KUPNA I SPRZEDAŻY, SZCZEGÓLOWO  
PODZIELONE NA GATUNKI I KSZTAŁTY MATERIAŁÓW

[giełda maszyn] PONAD 2300 AKTUALNYCH OGŁOSZEŃ  
KUPNA I SPRZEDAŻY

[wydarzenia] LISTA TARGÓW I IMPREZ BRANŻOWYCH  
ZE ŚWIATA

[aktualności] TECHNOLOGIE, WYWIADY, SPRAWOZDANIA,  
WSZYSTKO CZEGO POTRZEBUJESZ

[media] INFORMACJE O CZASOPISMACH  
BRANŻOWYCH Z CAŁEGO ŚWIATA

[video] RELACJE, WYWIADY,  
PREZENTACJE

 [www.4metal.pl](http://www.4metal.pl)  
 [www.4metal.de](http://www.4metal.de)  
 [www.4metal.cz](http://www.4metal.cz)  
 [www.4metal.com](http://www.4metal.com)  
 [www.4metal.nl](http://www.4metal.nl)  
 [www.4metal.at](http://www.4metal.at)  
 [www.4metal.be](http://www.4metal.be)  
 [www.4metal.ru](http://www.4metal.ru)  
 [www.4metal.ch](http://www.4metal.ch)  
 [www.4metal.it](http://www.4metal.it)  
 [www.4metal.ro](http://www.4metal.ro)  
 [www.4metal.hu](http://www.4metal.hu)  
 [www.4metal.us](http://www.4metal.us)



2005



2006



2007



2008



2009



2010



2011

GET THE MEMBERSHIP