

STALE AUSTENITYCZNE NOWEJ GENERACJI STOSOWANE NA URZĄDZENIA ENERGETYKI O PARAMETRACH NADKRYTYCZNYCH I ICH SPAWANIE

Jerzy Brózda
Instytut Spawalnictwa – Gliwice

Spalanie węgla kamiennego i brunatnego w kotłach energetycznych wprowadza do atmosfery dużą ilość zanieczyszczeń. Przez zastosowanie nadkrytycznych parametrów pary można zmniejszyć emisję zanieczyszczeń i zwiększyć sprawność bloków energetycznych, co wymaga jednak stosowania materiałów konstrukcyjnych nowej generacji, m. in. stali austenitycznych.

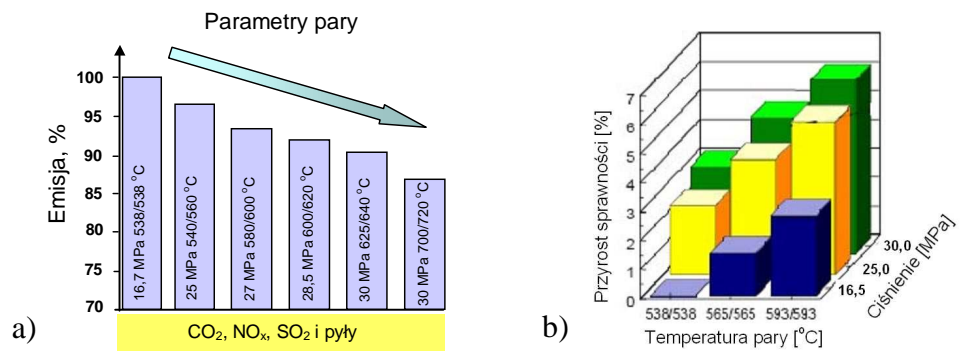
Przedstawiono rozwój w świecie bloków na parametry nadkrytyczne i ultra nadkrytyczne oraz stosowanych materiałów konstrukcyjnych. Zamieszczono wykaz stali austenitycznych stosowanych w budowie kotłów energetycznych. Podano podstawowe charakterystyki stali austenitycznych nowej generacji i omówiono zasady ich kształtowania oraz spawania.

1. ZAKRES STOSOWANIA STALI AUSTENITYCZNYCH

Wytwarzanie energii elektrycznej w Polsce oparte jest na węglu kamiennym i brunatnym, którego duże zasoby będą stanowiły podstawowe źródło energii przez kolejne dziesięciolecia. Spalanie węgla w kotłach energetycznych powoduje jednak emisję do atmosfery znacznych ilości zanieczyszczeń w postaci dwutlenku węgla (CO_2), dwutlenku siarki (SO_2), tlenków azotu (NO_x) i różnego rodzaju pyłów. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2001/80/WE z 23 października 2001 r. w sprawie „Ograniczenia emisji niektórych źródeł zanieczyszczeń do powietrza z dużych źródeł spalania paliw” ustala graniczne wartości dopuszczalne dla tych zanieczyszczeń [1]. Oznacza to, że wspomniana dyrektywa dotyczy całej krajowej energetyki zawodowej, a także w dużej części energetyki przemysłowej i komunalnej, gdzie 97% (140,8 TWh) całkowitej energii wytwarzanej jest z paliw stałych (węgiel kamienny i brunatny) [3]. Źródła energii elektrycznej i ciepła (elektrownie, elektrociepłownie i ciepłownie) będą musiały ograniczyć w ściśle określonym harmonogramie emisje: SO_2 , NO_x i pyłu [2, 3].

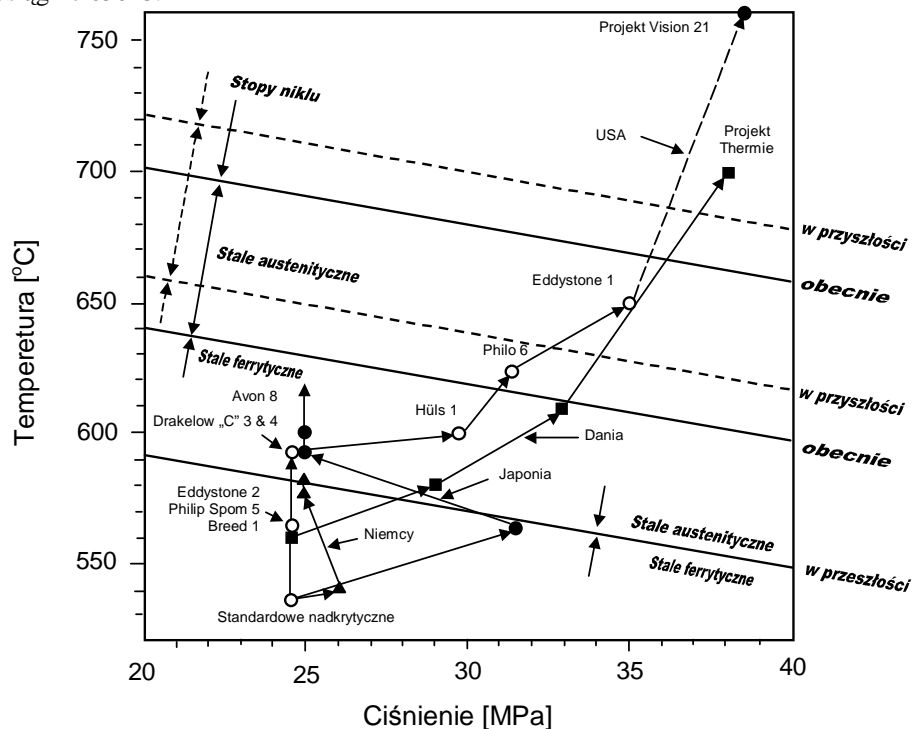
Krajowy system elektroenergetyczny jest w dużej mierze przestarzały [4, 5]. 40 bloków o mocy 200 MW osiągnęło w roku 2000. wiek 25-38 lat. Mimo prowadzenia przez wiele elektrowni i elektrociepłowni inwestycji proekologicznych, nadal spora liczba jednostek jest mało efektywna i nie spełnia norm dopuszczalnych emisji zanieczyszczeń NO_x , SO_2 i CO_2 [1]. Obserwuje się, w wielu przypadkach, obniżenie, już i tak niskiej, sprawności i dyspozycyjności bloków oraz wzrost awaryjności i kosztów remontów. Jednocześnie krajowy system energetyczny oceniany jest jako mało sprawny. Specjaliści branży energetycznej są zgodni, że obecne elektrownie będą w stanie zaspokoić potrzeby energetyczne kraju tylko do 2007–08 roku, przy założeniu ciągłej modernizacji bloków o łącznej mocy do 2000 MW rocznie.

Przez zwiększenie parametrów pary (temperatury i ciśnienia) do wartości nadkrytycznych można zmniejszyć emisję zanieczyszczeń do atmosfery i zwiększyć sprawność bloków energetycznych (rys.1). Wymaga to jednak zastosowanie materiałów konstrukcyjnych o większej wytrzymałości na pełzanie i zwiększonej odporności na utlenianie. W zależności od temperatury pracy stosuje się stale ferrytyczne, stale austenityczne i stopy niklu.



Rys.1. Wpływ parametrów pary na: a) emisję zanieczyszczeń oraz b) przyrost sprawności bloków energetycznych.

Na rysunku 2 podano nadkrytyczne parametry bloków energetycznych zbudowanych w różnych krajach oraz zakresy temperatur pracy stali ferrytycznych, austenitycznych i stopów niklu [8]. Górny zakres temperatur stosowania stali ferrytycznych zwiększył się z 560°C do 630°C, a w przyszłości osiągnie 650°C.



Rys. 2. Parametry bloków energetycznych o nadkrytycznych i ultra nadkrytycznych parametrach pary [8].

Ciekawa jest historia rozwoju bloków na parametry nadkrytyczne w Stanach Zjednoczonych [9, 10]. W roku 1959 najwyższe wówczas na świecie parametry pary (345 bar/649/566/566°C) zastosowano w bloku 325 MW (z podwójnym przegrzewem wtórnym) w elektrowni *Eddystone I*, należącej do *Philadelphia Electric Co*. Poprzedzone to było uruchomieniem w roku 1957 w elektrowni *Philo* należącej do *AEP-Ohio Power* bloku 125 MW (314 bar, 621°C z podwójnym przegrzewem wtórnym 566/538°C). Tak wysokie parametry pary świeżej wymagały zastosowania do budowy przegrzewaczy stali austenitycznych. Dyspozycyjność tych bloków była jednak bardzo niska. Miały

na to wpływ nieodpowiednia jakość stali oraz usterki montażowe. Wysokie koszty inwestycyjne, problemy eksploatacyjne i niewystarczająca trwałość stali austenitycznej z jednej strony, oraz niska cena paliwa, z drugiej strony, skłoniły Amerykanów do wycofania się ze stosowania ultra nadkrytycznych parametrów pary. Przez dłuższy czas budowano jednak w Stanach Zjednoczonych bloki na parametry nadkrytyczne. W latach 1960 ÷ 1990 zbudowano łącznie 162 bloki, w tej liczbie 121 bloków opalanych węglem, 40 na gaz ziemny a tylko 1 na olej opałowy. W latach 90. praktycznie nie budowano w USA nowych bloków węglowych [9].

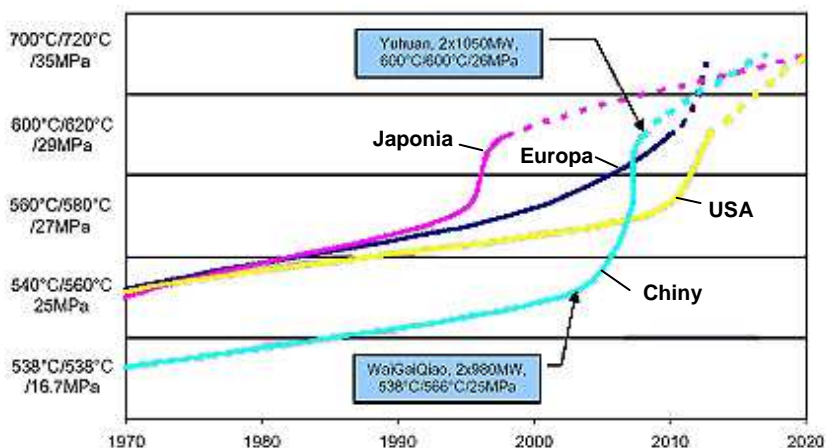
W Danii pierwszy blok na parametry nadkrytyczne uruchomiono w 1984 r. [9]. Do roku 1998 w elektrowniach należących do ELSAM oddano do eksploatacji 4 bloki na parametry nadkrytyczne oraz dwa bliźniacze bloki na parametry ultra nadkrytyczne.

W ramach programu THERMIE, wspieranego przez Unię Europejską, wykonywany jest projekt bloku na niespotykane dotychczas parametry pary świeżej 375 bar/700°C z dwustopniowym przegrzewem wtórnym. Rozpoczęcie budowy przewidziane jest w roku 2007 [9].

W Niemczech wybudowano w ostatnich latach szereg bloków o parametrach nadkrytycznych opalanych węglem brunatnym (Schwarze Pumpe, Boxberg IV, Lippendorf i Niederaußem). Do budowy kotła K w elektrowni Niederaußem oprócz stali P/T91 i E911 zastosowano stal austenityczną X3 CrNiMoN 17 13 [7].

W Japonii, która jest jednym z liderów wdrażania układów o parametrach nadkrytycznych, pracuje ok. 22 bloków o parametrach 24-25MPa/566-610°C w tym dwa bloki o parametrach 31MPa/566°C [8, 21].

Na rysunku 3 przedstawiono rozwój elektrowni parowych w Europie, Japonii, Stanach Zjednoczonych i w Chinach [14].



Rys. 3. Rozwój elektrowni z turbinami parowymi w Europie, Japonii, Stanach Zjednoczonych i w Chinach [14].

W Polsce budowane są obecnie dwie jednostki na parametry nadkrytyczne: w Elektrowni Pątnów II blok o mocy 460 MW (26,6 MPa/544°C) i w Elektrowni Łagisza w Będzinie - blok CFB 460 MW z kotłem fluidalnym (27,5 MPa/560°C). W pracujących starych typowych blokach 200 MW parametry pary wynoszą 13 MPa/540°C [13].

Rozwój energetyki cieplnej w kierunku stosowania wyższych temperatur pary, a tym samym osiągania większej sprawności, jest uwarunkowany dostępnością odpowiednich materiałów konstrukcyjnych. W części kotłowej bloku energetycznego kluczowymi elementami są szczelne ściany wykonane z cienkościennych rurek, przegrzewacze i przegrzewacze wtórne pary oraz grubościennie

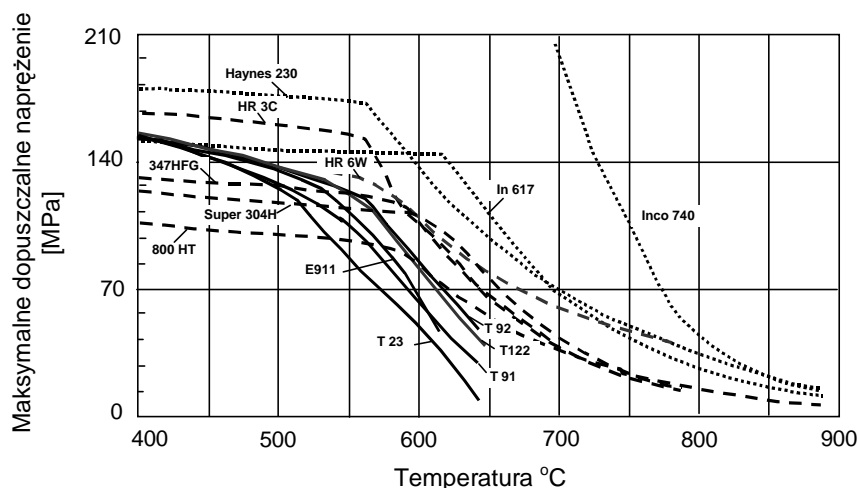
rury pary świeżej i komory. Wymagania stawiane każdemu spośród tych elementów obejmują: łatwość kształtowania, spawania i obróbki cieplnej. Poza tym stosowane stale powinny charakteryzować się [7]:

- wystarczającą odpornością na utlenianie, tak aby narastanie warstewki tlenków wewnątrz rurek i rur nie powodowało nadmiernego wzrostu temperatury ich ścianki;
- odpowiednią odpornością na korozję, aby zapewnić jak najmniejsze ubytki materiału od strony paleniska;
- takimi własnościami mechanicznymi, aby zapewnić długotrwałą pracę w wysokiej temperaturze (wytrzymałość na pełzanie) uwzględniając cykliczność obciążeń (odporność na niskocyklowe zmęczenie cieplne).

W wyniku szeroko prowadzonych badań w skali międzynarodowej w ostatnich dwóch dziesięcioleciach opracowano i wprowadzono do energetyki szereg nowych stali i stopów na elementy kotłów parowych i turbin. Obecnie można zbudować opalany węglem blok energetyczny o ultra nadkrytycznych parametrach pary 325 barów i 610°C [15]. Materiały te obejmują:

- stale ferrytyczne - stosowane do 650°C
- stale austenityczne - stosowane do 700°C
- stopy na bazie niklu - stosowane do 750°C.

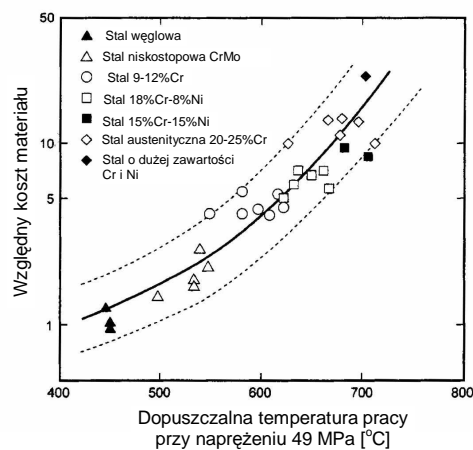
Przy czym grupa „stali ferrytycznych” obejmuje stale ferrytyczno-perlityczne, bainityczne i martenzytyczne. Podany zakres zastosowania tych materiałów wynika z ich wytrzymałości na pełzanie w poszczególnych temperaturach (rys. 4 [16]) i ich odporności na utlenianie.



Rys. 4. Maksymalne napięcia dla materiałów stosowanych w budowie bloków energetycznych o parametrach nadkrytycznych [16]

_____ stale ferrytyczne, - - - - - stale austenityczne, stopy niklu

Wraz z temperaturą pracy wzrasta również cena stali stosowanych na urządzenia pracujące w tych warunkach, co ilustrują dane zamieszczone na rysunku 5.

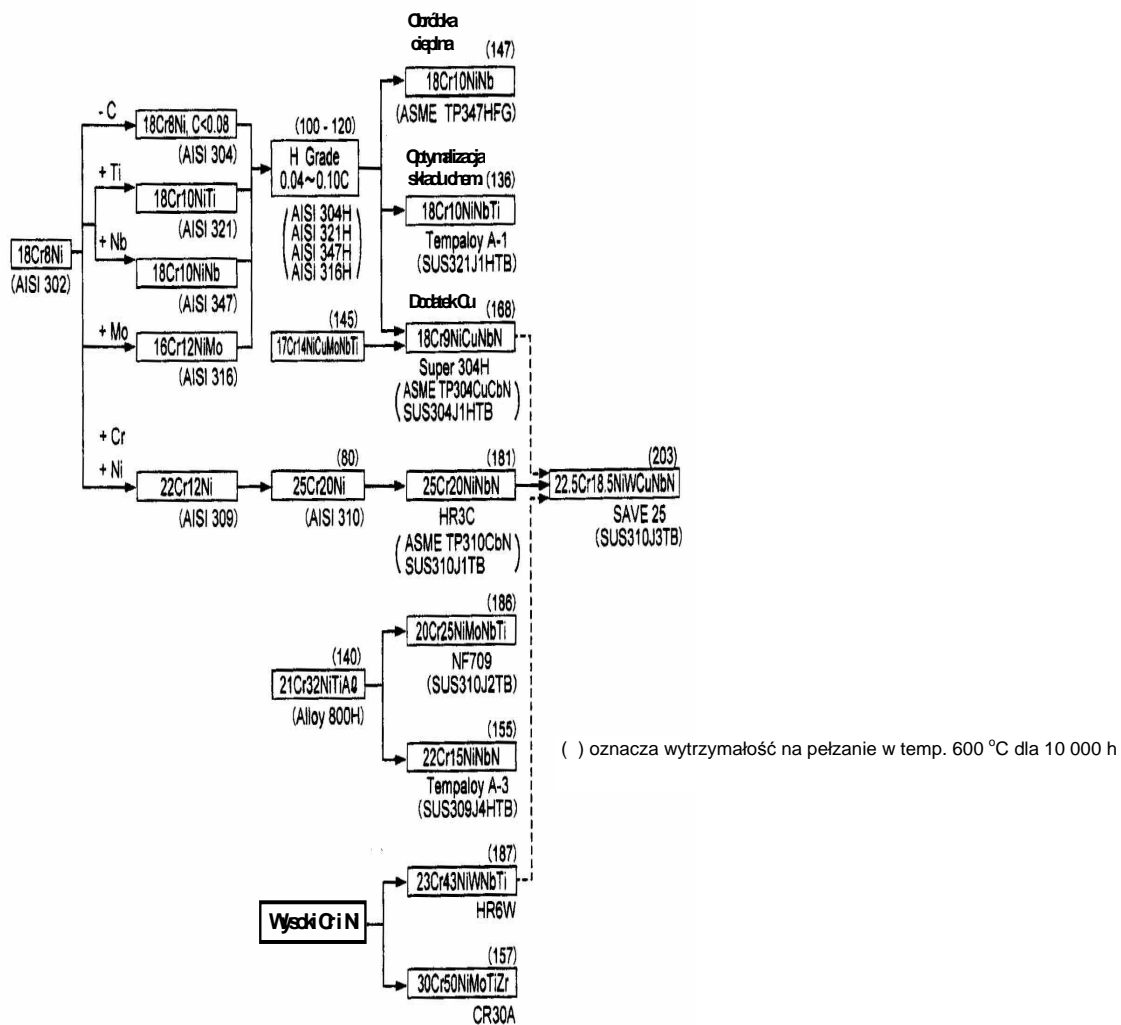


Rys. 5. Zależność względnego kosztu materiału od dopuszczalnej temperatury metalu przy naprężeniu 49 Mpa.

2. ROZWÓJ STALI AUSTENITYCZNYCH

Rozwój stali austenitycznych wg publikacji [16] przedstawiono na rysunku 6, a w tablicy 1 podano skład chemiczny stali nowej generacji stosowanych w budowie kotłów energetycznych.

Zestawione w tablicy 1 stale austenityczne o wysokiej wytrzymałości stosowane są na rury przegrzewaczy i przegrzewaczy wtórnych i można je podzielić na cztery grupy w zależności od zawartości chromu: 15Cr, 18Cr, 20-25Cr i wyższej [16]. W początkowym stadium rozwoju tych stali dodawano Ti i Nb w celu ich stabilizacji dla podniesienia odporności korozyjnej, następnie obniżono zawartości tych pierwiastków stabilizujących, aby zwiększyć wytrzymałość na pełzanie, z kolei dodano Cu dla uzyskania umocnienia przez drobne wydzielenia fazy bogatej w miedź i zmodyfikowano obróbkę cieplną. Dalsze trendy polegały na stabilizacji austenitu przez wprowadzenie 0,2 % azotu i dodaniu wolframu w celu umocnienia roztworowego. Najwyższą wytrzymałość na pełzanie ma stal SAVE 25, lecz jej odporność na korozję wysokotemperaturową w środowisku spalin nie jest zadawalająca [16, 17, 18].



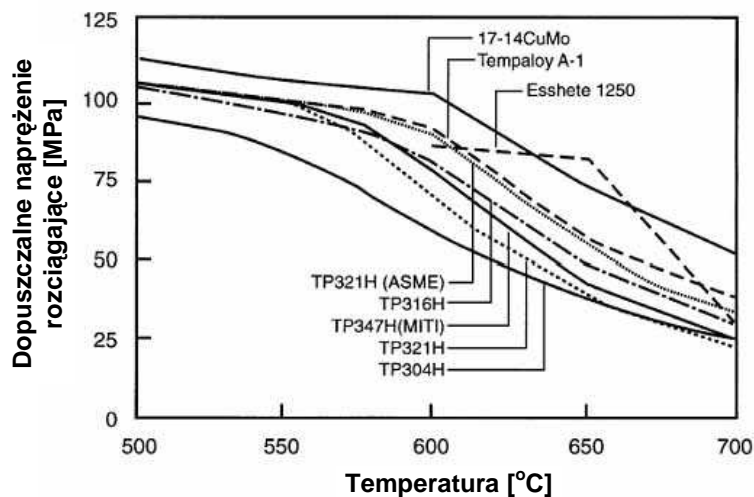
Rys. 6. Rozwój stali austenitycznych na urządzenia w energetyce [16].

Tablica 1. Nominalny skład chemiczny stali austenitycznych stosowanych w budowie kotłów energetycznych [16]

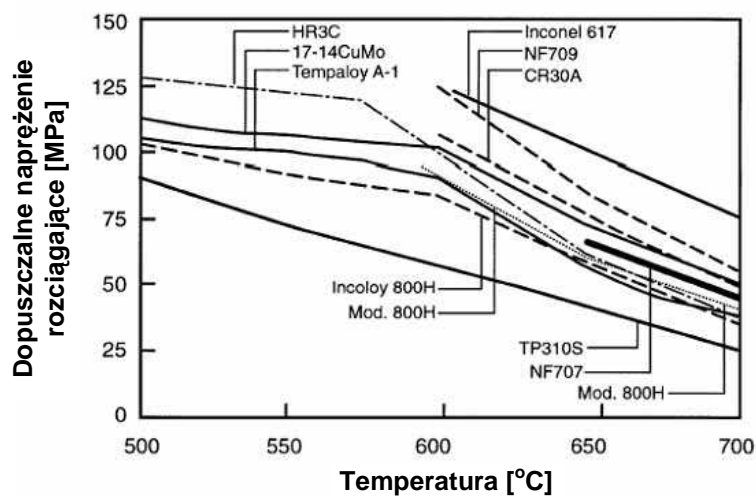
Grupa stali	Gatunek stali (JIS)		C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	W	V	Nb	Ti	B	Inne
	ASME	JIS												
18Cr – 8 Ni	TP304H	SUS304HTB	0,08	0,4	1,6	8,0	18,0	-	-	-	-	-	-	-
	Super 304H	SUS304J1HTB	0,10	0,2	0,8	9,0	18,0	-	-	-	0,40	-	-	3,0 Cu, 0,10 N
	TP321H	321HTB	0,08	0,6	1,6	10,0	18,0	-	-	-	-	0,5	-	-
	Tempaloy A-1	SUS321J1HTB	0,12	0,6	1,6	10,0	18,0	-	-	-	0,10	0,08	-	-
	TP316H	SUS316HTB	0,08	0,6	1,6	12,0	16,0	2,5	-	-	-	-	-	-
	TP347H	TP347HTB	0,08	0,6	1,6	10,0	18,0	-	-	-	-	0,8	-	-
	TP347 HFG		0,08	0,6	1,6	10,0	18,0	-	-	-	-	0,8	-	-
15Cr – 15Ni	17-14CuMo		0,12	0,5	0,7	14,0	16,0	2,0	-	-	0,4	0,3	0,006	3,0 Cu
	Esshete 1250		0,12	0,5	6,0	10,0	15,0	1,0	-	0,2	1,0	0,06	-	-
20 – 25Cr	TP310	SUS310TB	0,08	0,6	1,6	20,0	25,0	-	-	-	-	-	-	-
	TP310NbN (HR3C)	310J1TB	0,06	0,4	1,2	20,0	25,0	-	-	-	0,45	-	-	0,2 N
	Alloy 800H	NCF800HTB	0,08	0,5	1,2	32,0	21,0	-	-	-	-	0,5	-	0,4 Al
	Tampalloy A-3	SUS309J4HTB	0,05	0,4	1,5	15,0	22,0	-	-	-	0,7	-	0,002	0,15 N
	NF709	SUS310J2TB	0,15	0,5	1,0	25,0	20,0	1,5	-	-	0,2	0,1	-	-
	SAVE25		0,10	0,1	1,0	18,0	23,0	-	1,5	-	0,45	-	-	3,0 Cu, 0,2 N
Wysoki Cr i Ni	CR30A		0,06	0,3	0,2	50,0	30,0	2,0	-	-	-	0,2	-	0,03 Zr
	HR6W		0,08	0,4	1,2	43,0	23,0	-	6,0	-	0,18	0,08	0,003	-
	Inconel 617			0,4	0,4	54,0	22,0	8,5	-	-	-	-	-	12,5 Co, 1,2 Al

3. CHARAKTERYSTYKA STALI AUSTENITYCZNYCH NOWEJ GENERACJI I ZAKRES ICH STOSOWANIA

Zestawione w tabelicy 1 stale austenityczne podzielone zostały na cztery grupy: 18Cr-8Ni, 15Cr-15Ni, 20-25Cr i stopy o wysokiej zawartości Cr i Ni. Na rysunku 7 podano dopuszczalne naprężenia dla stali 18Cr-8Ni i 15Cr-15Ni, a na rysunku 8 – dopuszczalne naprężenia dla stali zawierających więcej niż 20% Cr [19].



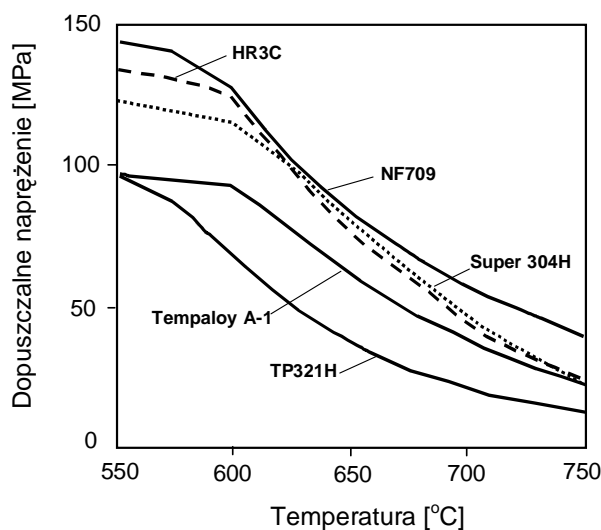
Rys. 7. Porównanie dopuszczalnych naprężeń dla stali austenitycznych 18Cr-8Ni oraz 15Cr-15Ni [19].



Rys. 8. Porównanie dopuszczalnych naprężeń dla stali austenitycznych o zawartości powyżej 20% Cr [19].

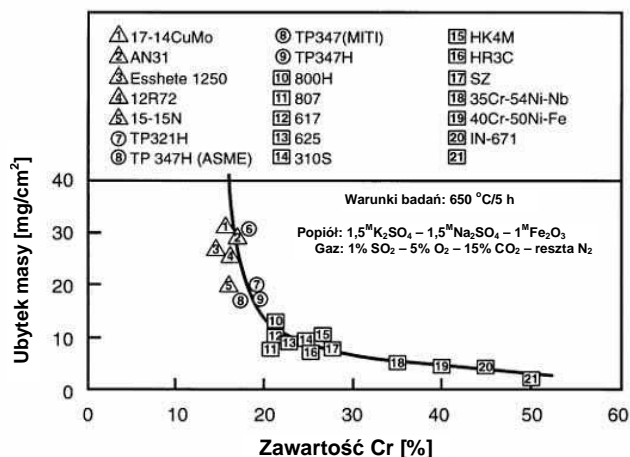
Oparte na stalach grupy 18Cr-8Ni zmodyfikowane stale austenityczne, takie jak: TP304H, TP316H, TP347H i Tempaloy A-1 oraz stale o mniejszej zawartości chromu i podwyższonej zawartości niklu, takie jak: 17-14CuMo i Esshete 1250, zaliczają się do grupy stali o zawartości Cr poniżej 20% (patrz tablica 1). Dopuszczalne naprężenia rozciągające dla tej grupy stali mieszczą się między dopuszczalnymi naprężeniami dla stali ferrytycznych a stali austenitycznych o wysokiej zawartości chromu. Opracowano szereg stali austenitycznych o zawartości chromu powyżej 20%, charakteryzujących się wysoką wytrzymałością na pełzanie, do których zalicza się stale: NF709, HR3C, SAVE 25. Stalami wiodącymi w zakresie zastosowań w najwyższych temperaturach są: SAVE 25, NF709, HR3C i Super 304H. Dla temperatur wyższych od 675°C stosuje się stopy na bazie niklu.

Na rysunku 9 porównano wartości dopuszczalnych naprężeń dla rur wykonanych z austenitycznych stali konwencjonalnych i stali nowej generacji. Nowe stale, jak stal SUS304J1HTB (SUPER304H) - opracowana przez Sumitomo Metal i stal SUS310J2TB (NF709) - opracowana przez Nippon Steel, mają bardzo wysoką wytrzymałość na pełzanie, a dopuszczalne naprężenia w temperaturze 650°C są dwukrotnie wyższe od naprężeń dopuszczalnych dla stali SUS321HTB (TP321H). Stale te są stosowane na rury przegrzewaczy pracujących w wysokich temperaturach. W przypadku dużego narażenia na korozję należy stosować stal SUS310J1TB (HR3C) o większej zawartości chromu (25 %) [20].



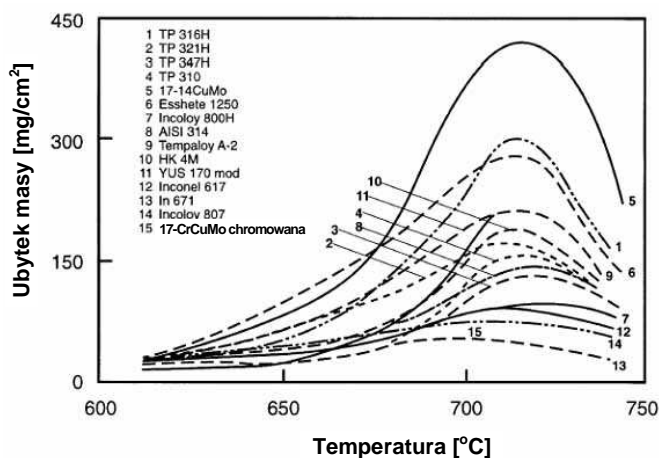
Rys. 9. Porównanie dopuszczalnych naprężeń dla rur z konwencjonalnych stali austenitycznych i ze stali austenitycznych nowej generacji [20].

Drugą ważną charakterystyką stali do pracy w wysokich temperaturach jest ich żaroodporność w środowisku, w którym się znajdują. Korozja w środowisku spalin jest wynikiem obecności stopionych trójsiarczków sodu, potasu i żelaza [19]. Ponieważ odporność na korozję w tym środowisku wzrasta wraz ze zwiększaniem zawartości chromu w stali, stale ferrytyczne grupy 9 – 12 % Cr są bardziej odporne od powszechnie stosowanych stali 2 ¼ Cr-1Mo. Znaczny wzrost odporności występuje w przypadku stosowania stali austenitycznych. Zależność odporności na korozję wysokotemperaturową w środowisku popiołu i gazu różnych stali austenitycznych i stopów niklu, wyrażoną przez ubytek masy, przedstawiono na rysunku 10. Z danych zamieszczonych na tym rysunku wynika, że w warunkach narażenia na korozję czynienie różnic między zachowaniem się stali ferrytycznych jest bezprzedmiotowe i zachodzi wówczas potrzeba zastosowania stali austenitycznych o zawartości powyżej 20 % chromu. Jak widać z rysunku 10, zwiększanie zawartości chromu powyżej 30 % w niewielkim już tylko stopniu podnosi odporność na korozję.



Rys. 10. Zależność ubytku masy metalu w wyniku korozji wysokotemperaturowej od zawartości chromu w różnych stopach [16].

Na rysunku 11 przedstawiono wyniki przyspieszonych badań laboratoryjnych różnych stopów austenitycznych w środowisku trójsiarczków, przeprowadzonych przez Ohtamo i in., a zamieszczonych w publikacji [19]. W temperaturze poniżej 600°C mała prędkość korozji jest prawdopodobnie wynikiem tego, że trójsiarczek znajduje się w postaci stałej. Powyżej temperatury 750°C procesy korozji również zachodzą wolniej, ponieważ trójsiarczki przechodzą w stan lotny. Największe ubytki korozyjne stwierdzono w zakresie temperatury 600÷750°C. Wyniki badań wskazują, że stal austenityczna TP 310 i stop nikiel Incoloy 800H są bardziej odporne na korozję w atmosferze spalin od innych stali i stopów. Największą odporność na korozję wykazał stop nikiel Inconel 671 (Ni-50Cr). Stale o mniejszej zawartości chromu, jak 316H, 321H i Esshete 1250, wykazują dużo większe ubytki korozyjne, przy czym najmniejszą odporność ma stal 17-14CuMo.



Rys. 11. Wpływ temperatury na ubytek masy różnych stali i stopów w wyniku korozji w atmosferze spalin [16].

Zastosowanie poszczególnych materiałów konstrukcyjnych w instalacjach energetycznych o różnych nadkrytycznych parametrach pary podano w tablicy 2.

Tablica 2. Przykład zastosowania poszczególnych materiałów w nadkrytycznych blokach energetycznych o różnych parametrach pary [19]

Element konstrukcji	31 MPa 365/565/565 °C	31 MPa 593/593/593 °C	31 MPa 620/620/620 °C	34,5 MPa 650/650/650 °C
Komory Rurociągi pary	P22, P23 P91, P92, P122	P91, P92, P122 E911	P92, P122 E911, NF12, SAVE 12	SAVE 12 NF12
Końcowy stopień przegrzewacza – środowisko niekorozyjne	T91, 304H, 347	TP347 HFG Super 304H	NF 709 Super 304H	NF 709 Inconel 617
Środowisko korozyjne	HR3C	HR3C SS347/IN72 ¹⁾	HR3C Super 304H/IN72 ¹⁾	CR30A NF 709/IN72 ¹⁾
Końcowy stopień przegrzewacza wtórnego	jak dla przegrzewacza	jak dla przegrzewacza	jak dla przegrzewacza	jak dla przegrzewacza
Ściana szczelna Część dolna Część górna	Stal węglowa T11, T12, T22	T11, T12, T22 T23	T11, T12, T22 T23	

¹⁾ Napawanie stopem IN72 (44Cr, reszta Ni) dla ochrony przed korozją

4. KSZTAŁTOWANIE STALI AUSTENITYCZNYCH

4.1. Kształtowanie na gorąco

Przed kształtowaniem na gorąco lub obróbką cieplną powierzchnię stali austenicznych należy oczyścić ze smarów, oleju i innych substancji. Mogą one wtąpić się w powierzchnię i w istotny sposób pogorszyć wygląd wyrobów, przez powstanie plam i szorstkich obszarów. Może również wystąpić nawęglenie powierzchni, które obniży odporność stali na korozję i podatność na kształtowanie. Gdy konieczne jest kształtowanie na gorąco, należy je prowadzić w zakresie temperatur 800÷1150°C [21].

4.2. Kształtowanie na zimno

Niska granica plastyczności i wysoka ciągliwość stali austenicznych stwarza bardzo dobre warunki do kształtowania na zimno. Duży stopień przeróbki powoduje znaczne utwardzenie przez zgniot, które należy usunąć przez obróbkę cieplną i przyspieszone chłodzenie.

Po przesycaeniu materiał należy ochłodzić w wodzie lub w powietrzu. W przypadku rur o małej grubości ścianki, chłodzenie odbywa się w powietrzu lub w atmosferze ochronnej [21]. Po kształtowaniu na zimno o stopniu przeróbki większym niż 15 % należy zawsze elementy poddać obróbce cieplnej – przesycaeniu.

5. SPAWANIE STALI AUSTENITYCZNYCH NOWEJ GENERACJI

Stale austenityczne mają ok. 45 % większy współczynnik rozszerzalności cieplnej, prawie o połowę niższą przewodność cieplną i również nieco niższą temperaturę topliwości od stali niskowęglowych. Większa rozszerzalność cieplna wymaga stosowania specjalnych środków ostrożności, aby uniknąć nadmiernych odkształceń spawanych elementów i zbyt dużych naprężeń pozostających. Odstępstwa między spoinami szepnymi powinny być dwukrotnie mniejsze niż podczas spawania zwykłych stali. Należy również stosować znane sposoby zapobiegania nadmiernym odkształceniom, jak spawanie ściegiem krokowym, przerywane spawanie odcinkami i spawanie z układaniem ściegów na przemian [22, 23]. Jeziorko spawalnicze stali austenitycznych jest bardziej gęstopłynne, co utrudnia rozplawianie się ciekłego metalu i sprzyja powstawaniu przyklejeń.

Poza ogólnymi zasadami spawania stali austenitycznych, podanymi w publikacji [24], należy jeszcze zwrócić uwagę na skłonność tych stali do powstawania pęknięć gorących typu krystalizacyjnego i likwacyjnego [22]. Pęknięcia krystalizacyjne mogą powstać w osi spoiny, mogą być usytuowane w kierunku poprzecznym lub występować jako mikropęknięcia. Pęknięcia likwacyjne zlokalizowane są w przyspoinowym obszarze SWC. Przyczyną powstawania pęknięć gorących są obecne na granicach ziarn fazy ciekłe o niższej temperaturze topliwości, wzdłuż których następuje dekohezja metalu w wyniku naprężeń skurczowych podczas krystalizacji i stygnięcia spoiny. Sposób przygotowania brzegów do spawania stali austenitycznych podano w tablicy 3.


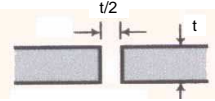
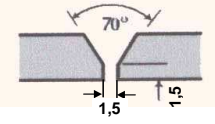
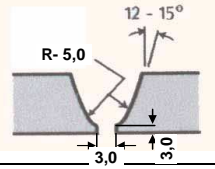
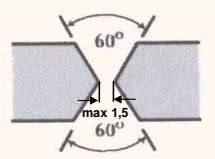
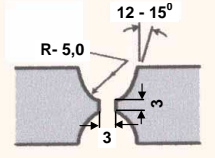
Stale austenityczne spawa się:

- ręcznie elektrodami otulonymi,
- elektrodą nietopliwą w osłonie argonu (TIG),
- elektrodą topliwą w osłonie gazów aktywnych (MAG) i obojętnych (MIG),
- łukiem krytym pod topnikiem.

Z uwagi na wymienione wcześniej własności fizyczne, stale austenityczne należy spawać stosując ograniczoną energię liniową, a temperatura międzyściegowa nie powinna przekraczać 150°C. Przy spawaniu ręcznym należy utrzymywać krótki łuk i stosować możliwie małe natężenie prądu. Spoiny wykonuje się ściegami prostymi, przy czym szerokość ruchów wahadłowych nie powinna przekraczać dwukrotnej średnicy elektrody.

Do spawania stali austenitycznych stosuje się w zasadzie spoiwa o składzie chemicznym materiału rodzimego. Małe odstępstwa od tej zasady mogą wynikać z różnych zastosowań spawanych elementów ze stali austenitycznych. Dla uniknięcia pęknięć gorących w spoinie stosuje się np. spoiwa o nieco większej zawartości chromu w celu uzyskania metalu spoiny z pewną ilością ferrytu, który zmniejsza skłonność do pęknięć krystalizacyjnych. W tablicy 4 podano materiały dodatkowe do spawania stali austenitycznych serii 300 stosowanych w urządzeniach dla energetyki.

Tablica 3. Przygotowanie brzegów do ręcznego spawania łukowego stali austenitycznych [25].

Grubość łączonych elementów [mm]	Przygotowanie brzegów
do 1,5	
1,5 – 5,0	
5,0 + 13,0	
13,0 – 20,0	
powyżej 20	
	

Tablica 4. Materiały dodatkowe do spawania stali austenitycznych [25, 26, 27]

Gatunek stali austenitycznej			Materiały dodatkowe do spawania		
ASME	PN-EN 10088	Nr materiału	Materiał stopiwa wg ASME	Elektrody otulone	Drut do spawania metodą TIG
TP304H	-	1.4948	308H	EN 1600 E 19 9 H AWS A5.4 E308H	EN 12072 19 9 H AWS A5.9 ER308H
TP321H	X6CrNiTi 18-10	1.4541	347	EN 1600 E 19 9 Nb AWS A5.4 E 347	EN 12072 19 9 NbSi AWS A5.9 ER347Si
TP316H	-	1.4919	316H	EN 1600 E 19 12 2 AWS A5.4 E 316H	EN 12072 19 12 3 AWS A5.9 ER316
TP347H	X6CrNiNb 18-10	1.4550	347	EN 1600 E 19 9 Nb AWS A5.4 E 347	EN 12072 19 9 NbSi AWS A5.9 ER347Si

6. PODSUMOWANIE

Stojące przed krajową energetyką, opartą o węgiel kamienny i brunatny, poważne zadania budowy bloków o parametrach nadkrytycznych, a w dalszej przyszłości – o parametrach ultra nadkrytycznych, stawiają przed projektantami i wykonawcami problem zastosowania stali austenitycznych na niektóre elementy przegrzewaczy i przegrzewaczy wtórnych narażonych na intensywne utlenianie. Celem niniejszego opracowania jest wstępne zapoznanie wymienionych grup osób z gatunkami materiałów wykorzystywanych obecnie w światowej energetyce i zakresem ich stosowania. Podano podstawowe charakterystyki stali austenitycznych nowej generacji i ogólne warunki ich kształtowania i spawania.

Literatura

- [1] Dyrektywa Nr 2001/80/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 23 października 2001 r. w sprawie ograniczenia emisji niektórych zanieczyszczeń do powietrza z dużych obiektów energetycznego spalania. [http://www2.ukie.gov.pl/HLP/files.nsf/0/96C037F531B60E16C1256F8D0040A125/\\$file/32001L0080-PL.doc](http://www2.ukie.gov.pl/HLP/files.nsf/0/96C037F531B60E16C1256F8D0040A125/$file/32001L0080-PL.doc)
- [2] Najgebauer E., Patrycy A: Zobowiązania polskiej energetyki wobec UE. <http://www.geoland.pl/dodatki/energia-xxxv/energ.belch.html>
- [3] Wstępna ocena wykonalności traktatu akcesyjnego w zakresie dyrektywy 2001/80/WE przez duże źródła spalania. <http://www.geoland.pl/dodatki/energia-xxxv/energoprojekt.html>
- [4] Studium rozwoju podsystemu wytwarzania energii elektrycznej do 2020 roku. Polskie sieci energetyczne S.A. Warszawa 1994 r.
- [5] Agencja Rynku Energii S.A: Założenia polityki energetycznej Polski do 2020r. "Projekt roboczy" - wersja 2. Warszawa, lipiec 1999 r.
- [6] Ingo P.: A technology successfully developed in developing countries. <http://www.worldbank.org/html/fpd/em/supercritical/supercritical.htm>
- [7] Scarlin B., Stamatelopoulos G.N.: New boiler materials for advanced steam conditions. Materials for Advanced Power Engineering 2002. Proceedings of the 7th Liège Conference. European Commission, University de Liège, Vol. 21, str. 1091-1108 (Part II).
- [8] Masuyama F.: Alloy development and material issues with increasing steam temperatures. Proceedings of the Fourth International Conference on Advances in Material Technology for Fossil Power Plants. Hilton Head Island, USA, October 2004.
- [9] Rakowski J.: Problemy wytwarzania energii przy wykorzystaniu nowych technologii. Polskie Sieci Elektroenergetyczne S.A. – Elektroenergetyka Nr 1/2002 (40), str. 9-27.
- [10] Smith J.W.: Supercritical (once through) boiler technology. Publikacja Babcock & Wilcox Company nr BR-1658, maj 1998.
- [11] Brózda J.: Studium spawalności nowej generacji materiałów żaroodpornych, odpornych na korozję i materiałów konstrukcyjnych o wysokiej wytrzymałości. Sprawozdanie z pracy badawczej Instytutu Spawalnictwa nr De-2 9SPUBBB 3,9/ZB/03). Gliwice, 2005.
- [12] Olszowiec P.: Po przeniesieniu radzieckich technologii na Zachód. Bloki ultranadkrytyczne. <http://www.gigawat.net.pl/article/articleview/220/1/28/>
- [13] Macura T.: Bloki nadkrytyczne. <http://info.ellaz.pl/GazetaEl.nsf/0/5a3883b755009da9c1256d8800347df9?OpenDocument>
- [14] Kern T., Wieghardt K., Kirchner H.: Material and design solutions for advanced steam power plants. Materiały konferencyjne jak w [8].

- [15] Blum R., Hald.: Benefit of advanced steam power plants. Materiały na konferencję jak w [7], str. 1009-1016 (Part II).
- [16] Viswanathan R., Purgert R., Rao U.: Materials technology for advanced coal power plants. Proceedings of the 1st International Conference "Super-High Strength Steels". Rome, Italy, November 2005.
- [17] Natesan K., Purohit K., Rink D.L: Fireside corrosion of alloys for combustion power plants. <http://www.ornl.gov/sci/fossil/Publications/RECENT%20PUBS/anl-4.pdf>
- [18] McDonald D.K.: Update on coal ash corrosion-resistant materials testing program. <http://www.netl.doe.gov/publications/proceedings/02/materials/McDonald0402rev1.pdf>
- [19] Viswanathan R., Bakker W.T: Materials for boilers in supercritical power plants. Proceedings of Joint Power Generation Conference. Miami Beach, Florida, USA, July, 2000.
- [20] Kimura H., Matsuda J., Sakai K.: Latest experience of coal fired supercritical sliding pressure operation boiler and application for overseas utility. http://www.bhk.co.jp/english/4technical/contents/pge2003paper_blr.pdf
- [21] Materiały informacyjne firmy DMV- stainless: High alloy materials for boiler tubes. http://www.dmv-stainless.com/fileadmin/media/pdf_brosch%FCren/Boiler_brochure.pdf
- [22] Materiały informacyjne firmy American Metallurgical Consultants: Stainless steel. <http://www.weldingengineer.com/Stainless%20Steel.htm>
- [23] Key to Metals Task Force & INI International: Welding of stainless steels. <http://www.key-to-steel.com/Articles/Art97.htm>
- [24] Poradnik Inżyniera tom 1 – Spawalnictwo, WNT 2003, str. 230÷232.
- [25] Materiały informacyjne firmy CIGWELD: Welding of stainless steel. <http://www.cigweld.com.au/pdf/pocketguide/213-400.pdf>
- [26] Materiały informacyjne firmy AvestaPolarit Welding AB, covered electrodes. <http://www.outokumpu.com/upload/documents/technical/datasheets/272001GB.pdf>
- [27] Materiały informacyjne firmy AvestaPolarit Welding AB, welding wire. <http://www.outokumpu.com/upload/documents/technical/datasheets/272101GB.pdf>

