

Materiały do budowy kotłów na parametry nadkrytyczne

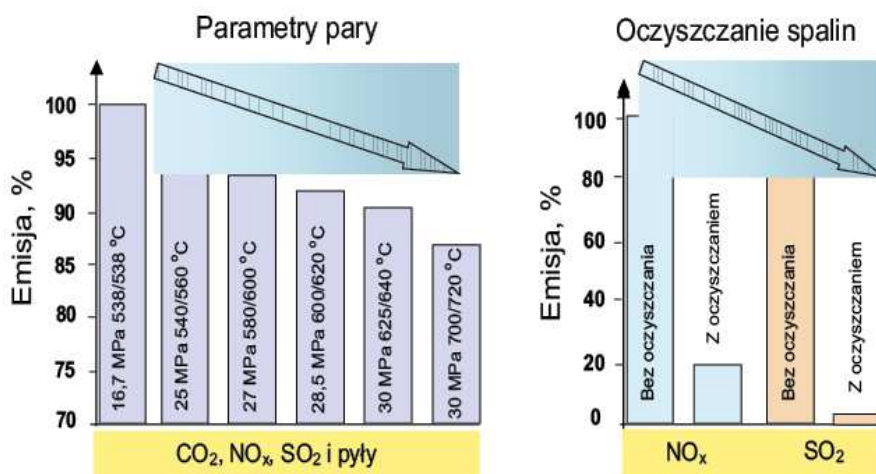
Autor: prof. dr hab. inż. Adam Hernas, Instytut Nauki o Materiałach, Politechnika Śląska

(„Nowa Energia” – 5-6/2013)

Rozwój krajowej energetyki warunkowany jest wieloma czynnikami, które można analizować w czterech grupach problemowych:

- prawne (Dokumenty Rady Europy - marzec 2007: Priorytety polityczne UE w zakresie energetyki, tzw. „3 x 20%” oraz Komisji Europejskiej - marzec 2011: „Energy Roadmap 2050...”, strategia gospodarki niskoemisyjnej. Krajowe uwarunkowanie hamujące proces inwestycji to: niepewne krajowe prawodawstwo, niejasne prognozy związane z przepisami dotyczącymi ochrony środowiska, nieprzewidywalny rozwój cen paliwa i certyfikatów CO₂, a także zmiany strategii właścicielskiej;
- poprawa wskaźników techniczno-ekonomicznych jest konieczna ze względu na zaawansowaną dekapitalizację urządzeń - około 40% bloków ma ponad 35 lat, co jest energetyczną emeryturą, a 10% osiągnęło wiek 50 lat, co przejawia się niską sprawnością (ok. 33%) i zwiększonymi kosztami eksploatacyjnymi, a także zmniejszoną dyspozycyjnością bloków. Podniesienie o 4% sprawności bloku energetycznego o mocy 1000 MW daje oszczędności węgla około 100 000 t/rok, a ponadto znacznie ogranicza emisję szkodliwych substancji (rys. 1);
- bezpieczeństwo energetyczne;
- inżynieria materiałowa - rozwój materiałów i technologii.

Uwarunkowania te powodują, że w sytuacji kiedy naszym podstawowym paliwem jest węgiel kamienny i brunatny jedynym racjonalnym kierunkiem poprawy stanu naszej energetyki jest modernizacja (podwyższenie parametrów pary, budowa duo-bloków) oraz budowa nowych bloków na nadkrytyczne parametry pary. Inne realizowane rozwiązania (OZE - energetyka wiatrowa) są drogie i nie rozwiązują problemu.



Rys. 1. Wpływ parametrów pary na emisję i sprawność kotłów

Sposób poprawy sprawności bloku energetycznego do wartości powyżej 40% można uzyskać przez:

- podwyższenie parametrów pary na bloku z 540°C/25 MPa do 600°C/30 MPa i wyżej,
- zastosowanie podwójnego przegrzewu pary,
- obniżenie ciśnienia kondensacji z ok. 6,5 kPa do 3 kPa (0,03 bar),
- zmniejszenie nadmiaru powietrza z poziomu 1,25 do 1,15,
- wykorzystanie ciepła spalin i obniżenie temperatury,
- obniżenie temperatury spalin wylotowych do 110-130°C,
- zastosowanie zmodernizowanej turbiny.

W świecie utrwalają się obecnie rozwiązania bloków na nadkrytyczne parametry pary o parametrach reprezentowanych przez wariant I, natomiast II wariant ma charakter wyprzedzający, będący przedmiotem badań realizowanych w ramach Projektu Strategicznego NCBiR pt.: *Zaawansowane technologie pozyskiwania energii: opracowanie technologii dla wysokosprawnych zero-emisyjnych bloków węglowych zintegrowanych z wychwytem CO₂ ze spalin.*

I wariant

- temperatura pary świeżej ok. 600°C i ciśnienie: 280-300 bar,
- temperatura pary wtórnie przegrzanej ok. 620°C i ciśnienie pary: 50-60 bar,
- sprawność ok. 40-44%.

II wariant

- temperatura pary świeżej: ok. 650°C i ciśnienie: ok. 300 bar,
- temperatura pary wtórnie przegrzanej: ok. 670°C i ciśnienie ok. 60 bar.
- sprawność ok. 45-50%.

Początki kotłów na nadkrytyczne parametry pary, tj. znacznie powyżej temperatury 538°C pary świeżej, miały miejsce w latach 60. ubiegłego stulecia (m. in. w USA i ZSRR), jednakże ciągłe problemy eksploatacyjne związane m.in. z materiałami niespełniającymi wymaganych właściwości użytkowych spowodowały szybki odwrót i pozostanie na standardowych parametrach pary aż do ok. 2000 r. Jest sprawą oczywistą, że nie jest możliwy rozwój technologii energetycznych bez rozwoju inżynierii materiałowej zapewniającej dostęp do materiałów spełniających wysokie wymagania:

- odpowiedniej czasowej wytrzymałości na pełzanie, $R_{Z/T} \sim (100-140)$ MPa,
- dużej stabilności mikrostruktury i właściwości,
- wysokiej odporności na utlenianie w parze wodnej i na korozję wysokotemperaturową,
- opanowanymi technologiami spawania i gięcia.

Prowadzone od lat 80. w świecie liczne programy badawcze doprowadziły do wprowadzenia na rynek nowych materiałów zakwalifikowanych do czterech grup, są to:

- niskostopowe stale o strukturze bainityczno-martenzytycznej (T23 i T24),
- wysokostopowe stale martenzytyczne z grupy 9-12%Cr+(Mo, W, Co) z mikrodotatkami
- Nb, N, B, (np. T/P91, T/P92, VM12),
- stale o strukturze austenitycznej Cr-Ni z mikrodotatkami, Nb, N, B, (np. Super 304, HR3C, Sanicro 25, HR6W),
- nadstopowy nikiel (np. In. 617 oraz DMV617mod.).

Skład chemiczny stali austenitycznych oraz stopów niklu rekomendowanych do zastosowań na elementy ciśnieniowe pracujące w warunkach największych obciążeń cieplno-mechanicznych przedstawiono w tab. 1. Natomiast temperaturowo-naprężeniowe zakresy stosowalności tych grup ilustruje rys. 2.

Podwyższenie temperatury pary z 540°C do 600-620°C spowodowało konieczność zastosowania stali austenitycznych w ilości około 17% masy elementów ciśnieniowych, a dalszy planowany wzrost temperatury wymaga dodatkowo zastosowania nadstopów niklu (tab. 2).

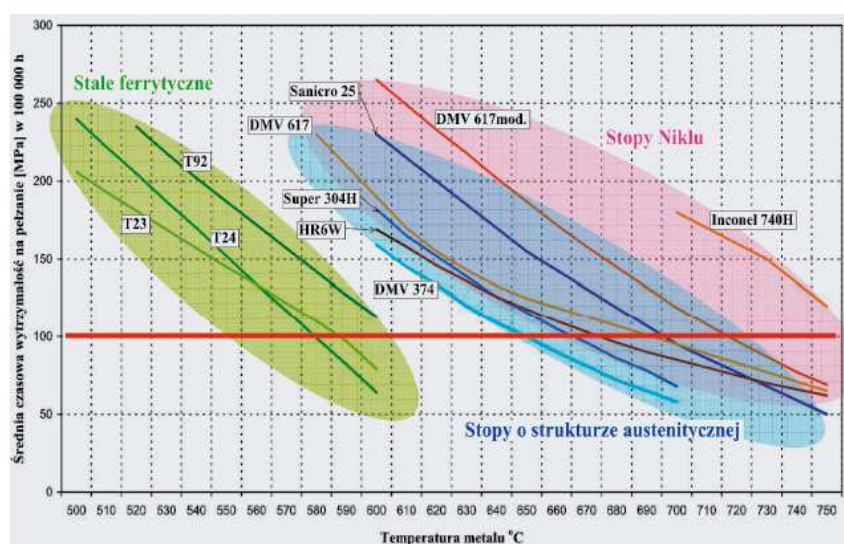
Stan wiedzy i dostępność materiałów z obiektywnymi charakterystykami i opanowanymi technologiami (BAT), głównie spawania, gięcia i obróbki cieplnej sprawił, że obecnie istnieje możliwość zaprojektowania kotła przepływowego na parametry supernadkrytyczne.

W realizowanym projekcie badawczym strategicznym NCBiR, RAFAKO S.A. przedstawiło projekt referencyjnego kotła na parametry 653°C/303 bar/672°C/60 bar dla bloku o mocy 900 MWe i sprawności około 50%.

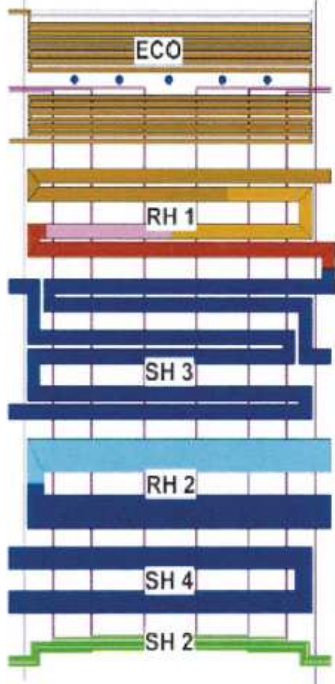
Szczegółnej analizie poddano elementy krytyczne części ciśnieniowej kotła decydujące o najwyższych dopuszczalnych parametrach pary pierwotnej i wtórnej na wylocie z kotła, tj.: przegrzewacz wylotowy pary pierwotnej SH III, przegrzewacz wylotowy pary wtórnej RH II, komora wylotowa przegrzewacza SH III, komora wylotowa RH II, rurociągi łączące kocioł - turbina.

Tab. 1. Nominalne składy chemiczne preferowanych stali austenitycznych oraz nadstopów niklu do zastosowań na elementy ciśnieniowe kotłów nad- i supernadkrytycznych

Gatunek	Nominalny skład chemiczny									
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu	Nb	W	N
TP347HFG	0,04-0,10	max. 0,75	max. 2,00	17,0-20,0	9,0-13,0	-	-	8 x C	-	-
Super 304 H	0,07-0,13	max. 0,30	max. 1,00	17,0-19,0	7,5-10,0	-	2,50-3,50	0,30-0,60	-	0,05-0,12
HR3C	0,04-0,10	max. 0,75	max. 2,00	24,0-26,0	17,0-23,0	-	-	0,20-0,60	-	0,15-0,35
SANICRO 25	<0,1	0,4	0,6	23	25	-	2,5	0,5	3	2 Co 0,2N +B
NF709	<0,15	1,0	1,5	23	25	1,5	-	0,3		0,2 N 0,2Ti
HR6W	<0,1	-		23	40	<2,0	-	<0,4	6	<0,2Ti
In 617	<0,1	12Co	1,0	22	52	9,0	1,2Al	-	0,4 Ti	-
DMV616mod	<0,1	12Co	0,6	22	52	9,0	1,2Al	-	0,6 Ti	N<0,05 B<0,01



Rys. 2. Zakresy stosowalności stali o osnowie ferrytycznej, austenitycznej i nadstopów niklu przeznaczonych do budowy kotłów nadkrytycznych



Powierzchnia	Orurowanie przegrzewaczy	Rozdzielacze, komory
ECO	13CrMo4-5, 16Mo3	15NiCuMoNb5-6-4 (wlot/wylot)
RH 1	16Mo3 10CrMo9-10 X10CrMoVNb9-1 VM12-SHC	16Mo3 (wlot) X10CrMoVNb9-1 (wylot)
SH 3	T347HFG Super 304H	X10CrMoVNb9-1 (wlot) X10CrWMoVNb9-2 (wylot)
RH 2	Super 304H HR3C	(X10CrMoVNb9-1) X10CrWMoVNb9-2 (wlot/wylot)
SH 4	Super 304H Super304H sp/sb	(X10CrMoVNb9-1) X10CrWMoVNb9-2 (wlot/wylot)
SH 2a	X10CrMoVNb9-1 X10CrWMoVNb9-2	X10CrMoVNb9-1
SH 2b	VM12-SHC	X10CrMoVNb9-1 (wylot)

Rys. 3. Konceptcje materiałowe czołowych firm projektowych występujące w projektach kotłów nadkrytycznych o temperaturze pary świeżej 600°C

Tab. 2. Udział materiałów jakościowych w masie elementów ciśnieniowych kotła w eksploatowanych i projektowanych kotłach

Parametry pary świeżej / wtórnej	Udział elementów konstrukcyjnych z poszczególnych grup stali, [%]			
	Stale niskostopowe	Stale martenzytyczne	Stale austenityczne	Nadstopy niklu
540°C/180bar /540°C	80	20 (X20CrMoV12.1)	-	-
600°C/285bar/610°C	52	31	17	-
653°C/ 303bar/672°C	35	45	15	5

Dobre materiały dla obliczeniowych parametrów pary pierwotnej kotła referencyjnego przedstawiono w tab. 3.

Tab. 3. Wykaz dobranych materiałów dla przyjętych parametrów obliczeniowych

Parametry pary pierwotnej: T_{cztyna} = 653 [°C]; p_{cztyna} = 30.3 [MPa]				
Element	Materiał	Wymiary obliczeniowe średnica x grubość ścianki	Parametry obliczeniowe	
			T_{ob}	P_{ob}
		[mm]	[°C]	[MPa]
Wężownice	X6CrNiNbN25-20	φ 42.4 x 8	645	32
	NF709		660	32
	HR6W	φ 42.4 x 8.8	674	32
	Sanicro 25		689	32
	NiCr23Co12Mo DMV 617 mod		703	32
Komora wylotowa	HR6W	φ 220 _w x 75	668	31.5
Rurociągi do turbiny	HR6W	φ 280 _w x 75	658	31.5

Instytut Nauki o Materiałach Politechniki Śląskiej i RAFAKO S.A. są współwykonawcami zadania badawczego *Badania materiałowe* realizowanego od 2010 r. projektu strategicznego. Prowadzone są badania jednorodnych i mieszanych złączy spawanych wykonywanych w RAFAKO S.A., pozwalających na opracowanie pełnych charakterystyk strukturalnych oraz właściwości wytrzymałościowych i technologicznych materiałów zestawionych w tab. 3. Pozwolą one na zdobycie wiedzy i własnego *know-how*. Dotychczasowym efektem prowadzonych badań jest uzyskanie przez RAFAKO S.A. kwalifikacji TÜV Nord technologii spawania i gięcia rur przegrzewaczowych ze stali Sanicro 25 oraz HR6W. Badania rur z nadstopu DMV 617mod są w toku realizacji.