

ASPEKTY WDRAŻANIA NOWYCH MATERIAŁÓW W BUDOWIE KOTŁÓW

Roman Czerniawski

RAFAKO S. A., Racibórz



PL9702395

Tendencje światowe rozwoju w budowie kotłów i materiałów do ich budowy. Uwarunkowania wdrażania nowych materiałów na części ciśnieniowe kotłów wynikające z wymagań projektanta, wytwórcy i użytkownika. Gospodarczo-ekonomiczne aspekty wdrażania nowych materiałów do budowy kotłów w warunkach wolnorynkowych.

1. WPROWADZENIE (SYTUACJA I PROGNOZY)

Kocioł jest reaktorem cieplnym w bloku energetycznym, a zadaniem bloku energetycznego jest wytwarzanie prądu elektrycznego, stosunkowo łatwego w dystrybucji do odbiorcy. Cały wysiłek w tym zakresie nakierowany jest na uzyskanie możliwie najwyższej sprawności w łańcuchu zmian rodzaju energii - w kotle, turbinie i generatorze (które razem tworzą klasyczny blok) oraz zminimalizowanie kosztów użytkowania środowiska naturalnego.

Bloki klasyczne budowane po wojnie [1] pracują przy sprawności w granicach 30 do 35%. Obecny poziom techniki pozwala uzyskiwać sprawności nawet do 46%. Zwiększenie efektywności spalania paliw kopalnianych, polegającej na zwiększeniu produkcji energii elektrycznej bez zwiększania emisji spalin i popiołów, można prowadzić dwoma drogami:

- poprzez modernizację istniejących bloków,
- poprzez budowę nowych elektrowni ze zwiększoną sprawnością.

Pamiętać trzeba, że mamy do czynienia z najdroższymi stanowiskami pracy i najkosztowniejszymi inwestycjami. W kraju, dzięki zdecentralizowaniu energetyki, kapitał inwestycyjny jest rozdrobniony i póki co nie można go skupiać na zaplanowanych obiektach.

Skala prognozowanych zmian w zakresie przyrostu mocy do 2000 roku wg EUROPROGRAMU obejmującego Europę EWG (bez Wielkiej Brytanii) jest następująca:

Energia jądrowa	12300 MW
Węgiel kamienny i brunatny	23200 MW
Gaz ziemny	24800 MW
Modernizacja starych elektrowni	8800 MW
Olej	4100 MW

Oczekiwane jest podniesienie sprawności do:

- ok. 40% na węglu brunatnym,
- ok. 45% na węglu kamiennym.

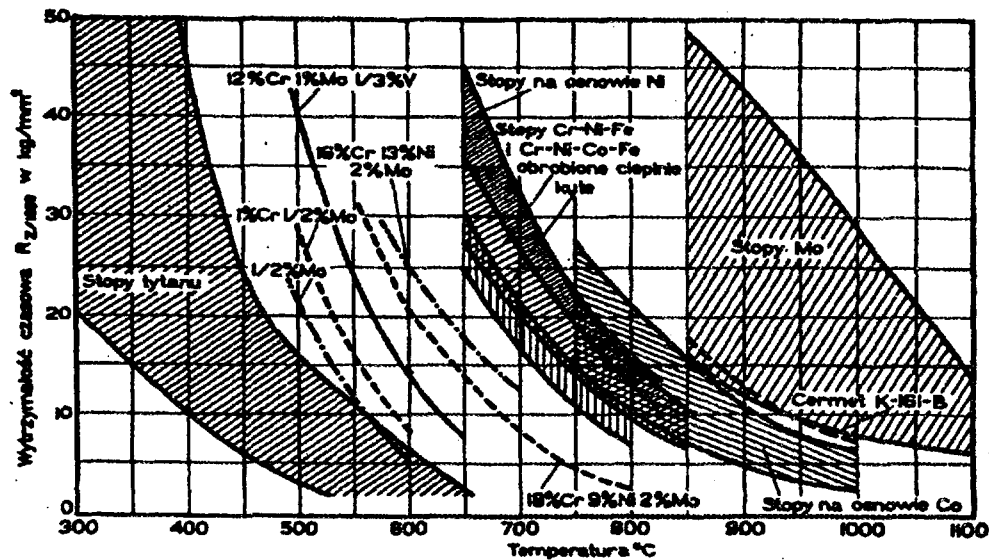
Na te dwa nośniki energii szacunkowy przyrost wynosi ok. 24000 MW.

Podwyższenie sprawności w klasycznych blokach energetycznych można uzyskać poprzez:

- 1) zmniejszenie nadmiaru powietrza w kotle z 1,25 na 1,15ok. 0,1% sprawności,
- 2) obniżenie temp. spalin wylotowych za kotłem ze 130 na 120°C .ok. 0,15% sprawności,
- 3) zmianę parametrów pary z 250 bar/540°C na 300 bar/600°C . . .ok. 1,5% sprawności,
- 4) zastosowanie podwójnego przegrzewu paryok. 1% sprawności,
- 5) obniżenie ciśnienia kondensacji z 0,065 bar na 0,03 barok. 1,5% sprawności.

Z punktu widzenia omawianego tu tematu najistotniejszą z przytoczonych zmian jest wymieniona w punkcie 3. Zmiana parametrów pracy kotła (którego sprawność obecnie sięga 89 do 91%) ściśle wiąże się ze sprawą zastosowanych w jego budowie materiałów (rys. 1.).

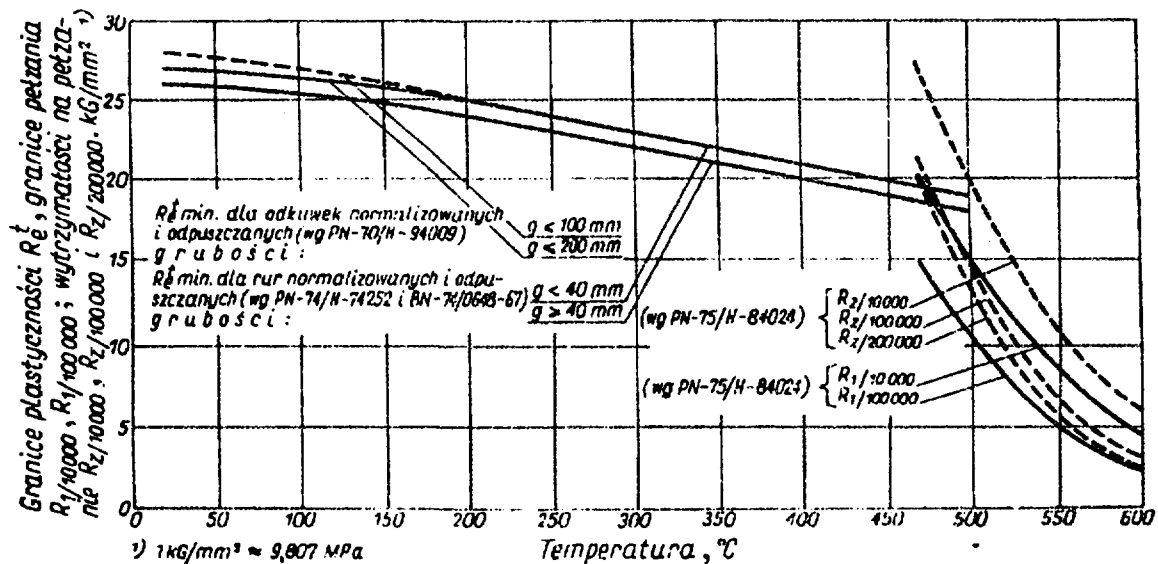
Pozostałe 4 zmiany raczej nie stanowią bariery materiałowej i będą wprowadzane głównie na drodze zmian projektowo-konstrukcyjnych. Dalej zajmować się będziemy wyłącznie materiałami narażonymi na ekstremalne warunki pracy (zwłaszcza temperaturowe), pomijając materiały stosowane na elementy pracujące przy niższych parametrach. Materiały, ściślej stale, stosowane do budowy kotłów różnią się od pozostałych stali konstrukcyjnych tym, że o ich zastosowaniu nie decydują własności mechaniczne określone przy temperaturach pokojowych.



Rys.1. Wytrzymałość czasowa dla 1000 godz. różnych materiałów żarowytrzymałych w zależności od temperatury [2].

W miarę wzrostu temperatury twardość, granica plastyczności i wytrzymałość stali zmniejszają się. Początkowo niewielki spadek, w granicach 350 do 450°C, (w zależności od zawartości składników stopowych) zaczyna coraz bardziej się zwiększać. Istotą jednak nie tyle jest sam spadek własności określonej w próbie doraźnej, ile czas trwania próby.

Nie można wnioskować o zachowaniu się materiału powyżej 350°C na podstawie krótkotrwałej próby. Występuje bowiem i zaczyna być dominujące zjawisko pełzania, polegające na plastycznym odkształcaniu się stali z upływem czasu pod obciążeniem mniejszym od granicy plastyczności. Powstałe odkształcenia mogą być mniejsze lub większe, ale wielkość ich zależy zawsze od temperatury i obciążenia (naprężenia jednostkowego). Wielkościami charakteryzującymi ten problem są - granica pełzania i wytrzymałość czasowa.



Rys.2. Granice plastyczności przy podwyższonych temperaturach, granice i wytrzymałość na pękanie wg obowiązujących norm dla stali 10H2M [3].

Z powodów bezpieczeństwa eksploatacyjnego konstrukcji do obliczeń brana jest spośród charakteryzujących własności materiału cech (R_e , R_z i R_1) ta, której zastosowanie daje najniższy wynik w obliczaniu grubości ścianki dla danej temperatury obliczeniowej i czasu pracy 100 000 godzin lub więcej (ostatnio coraz częściej 200 000 godzin). Taką procedurę przewidują stosowne przepisy Urzędu Dozoru Technicznego.

2. MATERIAŁY NA ELEMENTY CIŚNIENIOWE KOTŁA

Wyżej opisany powód wyjaśnia główną przyczynę trudności we wdrażaniu nowych materiałów do przemysłu kotłowego. Nie ma takiej wiarygodnej procedury, według której projektant mógłby drogą interpolacji wyników uzyskanych w krótkich czasach lub współczynników przeliczeniowych przyjmować do obliczeń wartości ważne na 20 lat eksploatacji kotła.

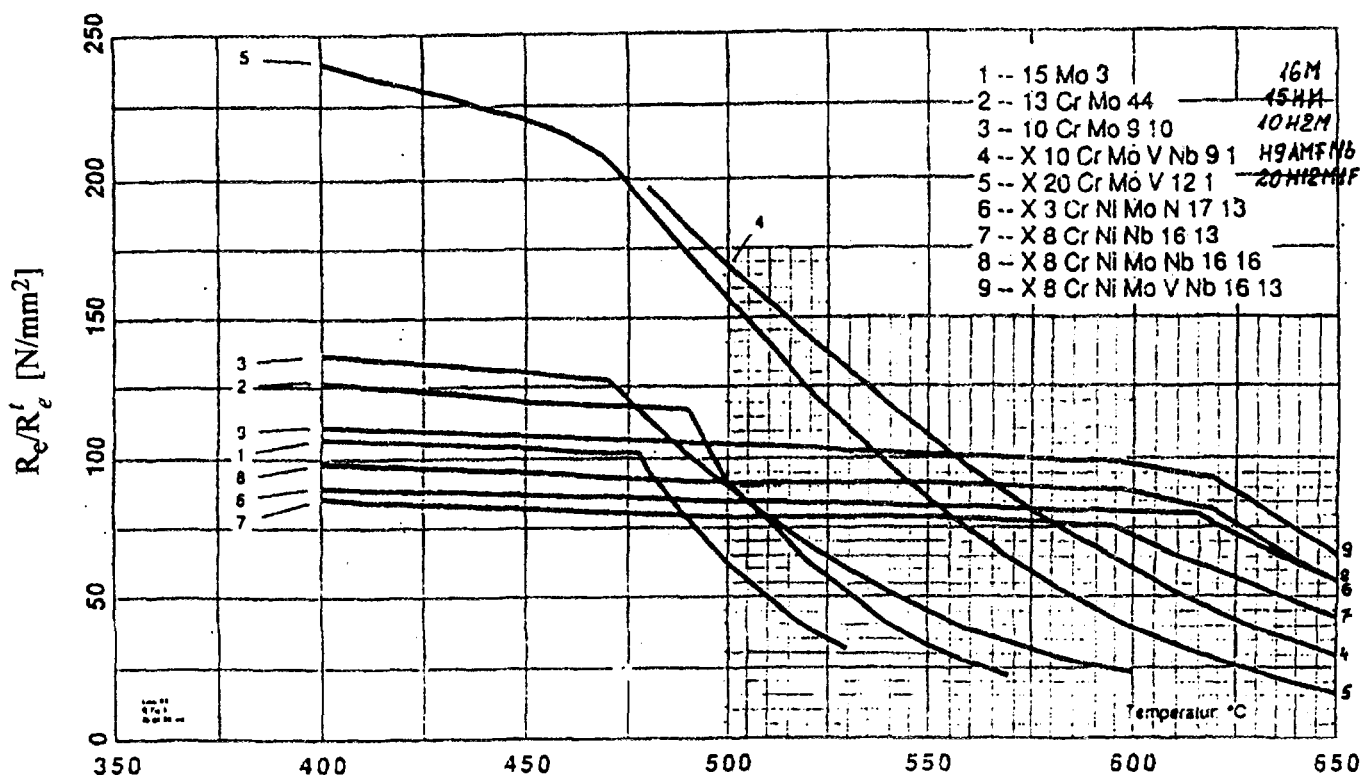
Natomiast siłą napędową, zmuszającą do poszukiwania i wdrażania nowych materiałów, jest nacisk (głównie użytkownika) na podniesienie sprawności bloku energetycznego drogą podniesienia parametrów pracy kotła.

Do tej pory używane w polskim kotłownictwie stale musiały sprostać zgodnie z PN-77/M-34150 następującym maksymalnym parametrom:

wydajność kotła 221 do 256 MW,
 ciśnienie 18,5 do 19,5 MPa,
 temperatura pary 535 do 545 $^{\circ}\text{C}$,
 temperatura wody zasilającej ... 235 do 275 $^{\circ}\text{C}$.

Do pracy przy takich parametrach wdrożono w RAFAKO m.in. niemiecką stal X20CrMoV12.1, której polskim odpowiednikiem została później stal 20H12M1F. Ze stali tej wykonywano przegrzewacze pary i komory grubościenne. Jest to stal trudna w technologii przetwórczej, głównie w zakresie spawania, a zwłaszcza łączenia z innymi gatunkami stali. Niemniej ta właśnie stal jest ostatnią w pełni wdrożoną w RAFAKO nową stalą (nie licząc stali na elementy energetyki jądrowej).

Wykonane w ostatnich latach uprawnienia do wykonywania elementów kotłowych w RAFAKO ze stali amerykańskiej - T91 i P91, a następnie polskiego odpowiednika - H9AMFNb, nie doczekały się wdrożenia z prozaicznego braku stosownego zamówienia. Stąd nienaruszony został stan gatunków stali przeznaczonych dla przemysłu kotłowego zawarty w normie PN-75/H-84024. Stal do pracy w podwyższonych temperaturach. Gatunki.



Rys. 3. Granice plastyczności i wytrzymałości na pełzanie w podwyższonych temperaturach dla różnych stali kotłowych

Kierunki poszukiwania nowych materiałów w miarę podwyższania parametrów pracy przybliża liczący kilkadziesiąt lat wykres na rys.1. Nie zawiera on później udoskonalonych stali ferrytyczno- martenzytycznych, jak np. wyżej wspomnianych stali P91 lub T91 oraz stali z azotem. Tendencje rozwoju stali dla energetyki lepiej oddaje poniższe zestawienie tabelaryczne [1] stali kotłowych stosowanych w określonym czasie i dla określonych parametrów pracy.

Tabela 1.

LATA	SYMBOL STALI	PARAMETRY PRACY	
		P bar	T°C
1960	13CrMo44 10CrMo910 14MoV63	300	540
60 - 70	X20CrMoV12.1	250	560
70 - 85	T91	310	566
	P91		
	F91	290	580
1993	TB9 TB12 NF616 HCM12A TB12M E911	350	600

Jak widać z symboli stali, stanowią one mieszanię o symbolach najpierw niemieckich, następnie amerykańskich a na końcu japońskich, co przy okazji odzwierciedla miejsca, gdzie następował największy postęp w rozwoju nowych gatunków stali dla energetyki. Trzymając się symboliki niemieckiej można utworzyć ciąg rozwojowy pokazany na rys.3.

Śledząc najnowsze zastosowania trzeba wymienić Elektrownię KAWAGOE w Japonii, gdzie w 1989 r. zastosowano stale wymienione w pozycji lat 70-85 tabeli 1 dla parametrów 310bar i 566°C oraz 2 bloki 400 MW w ELSAM, gdzie zastosowano stal P91 przy parametrach 290 bar i 580°C - uznając to za graniczne zastosowanie tej stali.

Wymienione pod datą 1993 w tabeli 1 stale, lansowane przez Uniwersytet Tokijski (prof. FUJITA), są dopiero przygotowywane do zastosowania. Mają one podwojone w stosunku do stali X20CrMoV12.1 własności wytrzymałościowe - lecz znacznie krótszą historię.

Wszystkie takie zestawienia cech głównych nowych stali, powstałe na bazie zebranych luźnych informacji i czyichś (na ogół) doświadczeń, są podstawą do zebrania informacji źródłowych i analizy zagadnienia pod kątem zastosowania.

Jedno trzeba założyć - regułą jest, że każda następna stal jest droższa wagowo, co nie musi być jednak barierą dla wdrożenia. Cena wzrasta nie tylko z powodu wzrostu ilości składników stopowych, lecz również z konieczności stosowania coraz bardziej wyrafinowanych technik metalurgicznych. Widocznym trendem jest zmniejszanie ilości węgla poniżej 0,1% i wiązanie go specjalnymi dodatkami.

Ta ostatnia uwaga dotyczy nie tylko stali martenzytycznych lecz także stali czy stopów austenitycznych, w których węgiel powoduje powstawanie problemów technologicznych, zwłaszcza przy połączeniach spawanych (np. zjawisko uwrażliwienia na korozję). Chodzi o to, że temperatura pracy (600 do 700°C) jest temperaturą uwrażliwienia dla stali austenitycznych. Na marginesie można odnotować, że te ostatnie stale mają dość długą historię, zatem w BS 3059:Part 2:1990 określone są charakterystyki pełzaniowe doprowadzone do 250.000 godz. Mimo to, znamy tylko 2 zastosowania tych stali na elementy ciśnieniowe kotłów (W. Brytania i Dania), powstałe prawdopodobnie drogą sponsorowania dla zdobycia doświadczeń.

Pomijając cenę tych stali, przepisy kotłowe, nie tylko polskie lecz także niemieckie, nie kwalifikują ich do budowy kotłów. Inaczej ma się w tym zakresie sprawa z energetyką jądrową.

3. UWARUNKOWANIA WDROŻEŃ NOWYCH MATERIAŁÓW

W miarę zbliżania się parametrów kotłów do parametrów kotła nadkrytycznego (gdzie woda może występować wyłącznie w postaci pary przegrzanej bez etapu pary nasyconej) projektant musi dokonywać nowych wdrożeń. Znając przytoczone wyżej kierunki poszukiwań poddaje sprawdzeniu:

- kompletność karty (charakterystyki) materiałowej,
- referencje i dostępność materiału.

Jeśli idzie o referencje to sprawa jest dość prosta - kto, kiedy, gdzie i z jakim skutkiem zastosował dany materiał, biorąc jednocześnie pod uwagę czas jaki upłynął od zastosowania. Kto, po jakich cenach, w jakiej postaci i na jakich warunkach produkuje dany materiał, tzn. wg jakiego dokumentu (normy) oraz jaka instytucja dozoru technicznego nadała mu uprawnienia kotłowe. Cały kłopot to dotarcie do wiarygodnych danych, czyli zebranie możliwie szerokich i zweryfikowanych informacji.

Jeśli idzie o charakterystykę to sprawa wymaga bardziej żmudnej pracy. Nie tylko trzeba zdobyć stosowne a wiarygodne dokumenty oraz sprawdzić czy są kompletne w zakresie danych chemicznych, fizycznych, mechanicznych (statycznych a nierzadko też dynamicznych) oraz czasowych i temperaturowych, ale trzeba te dane poddać szczegółowej, merytorycznej analizie na tle m.in. poprzednio stosowanych gatunków.

Głównym aspektem tego etapu są dane dotyczące obliczeń wytrzymałościowych w temperaturach pracy projektowanego elementu kotła. Projektant ze względów bezpieczeństwa musi uwzględniać odchyłki (przekroczenia) parametrów nominalnych jakie mogą wystąpić w trakcie eksploatacji kotła. Pobieżne nawet spojrzenie na rys.2 wystarczy dla zorientowania się, że własności powyżej 450°C są ułożone w coraz bardziej stromą charakterystykę. Powoduje to przy niewielkim przyroście temperatury znaczny spadek własności. Praktycznie projektant zakłada własności stali dla temperatury o 50°C wyższej od nominalnej (obliczeniowej). Efektem jest większa grubość ścianki rzeczywistej od obliczeniowej. Z takiego postępowania wynika, że projektant nie zastosuje nowego gatunku, jeśli jego charakterystyka nie obejmuje zakresu o min. 50°C ponad zakres parametrów nominalnych, przewidzianych dla projektowanego elementu kotła.

Jeśli aspekty techniczne nowego materiału są pozytywne, projektant dokonuje wstępnej weryfikacji ekonomicznej zastosowania nowego materiału. Do tego celu najlepiej służą dane wskaźnikowe, których przykładem mogą być wykresy zamieszczone na rys. 4. i 5. Pozwalają one niejednokrotnie udowodnić, że zastosowanie droższego materiału przy cieńszych ściankach (mniejszym ciężarze) nie podraża, a wręcz obniża koszty inwestycji. Jednocześnie metoda wskaźnikowa może wykazać inne kierunki rozwiązań, gdyż za każdym razem mamy do czynienia z możliwością zastosowania "łatwiejszego" technologicznie materiału, co w efekcie zmniejszy całkowite koszty procesów wykonawczych. Trudnością obecną, jest zebranie danych do utworzenia wskaźników (cen) ze względu na rozbudowany łańcuch pośredników (ilości i wielkości marż, wyników negocjacji, umów itp).

Po wstępnej, pozytywnej akceptacji nowego gatunku materiału, następuje przymiarka wykonawcy do postawionego zadania. Praktycznie od tego momentu zaczyna się rzeczywisty proces wdrożenia (często określanym jako - "w metalu").

Aby wdrożyć nowy materiał wytwórca musi posiadać umiejętności technologicznego przerobu nowego materiału - tak, aby w trakcie jego przetwarzania w elementy kotłowe nie nastąpiło obniżenie poziomu własności w stosunku do stanu wyjściowego. Wdrożenie może

się wiązać także z koniecznością uzupełnienia warsztatu wykonawczego o narzędzia i urządzenia, a także z opanowaniem nowych technik produkcyjnych. Pozytywnym egzaminem dla wytwórcy jest uzyskanie uprawnień niezależnego od wytwórcy Urzędu Dozoru Technicznego.

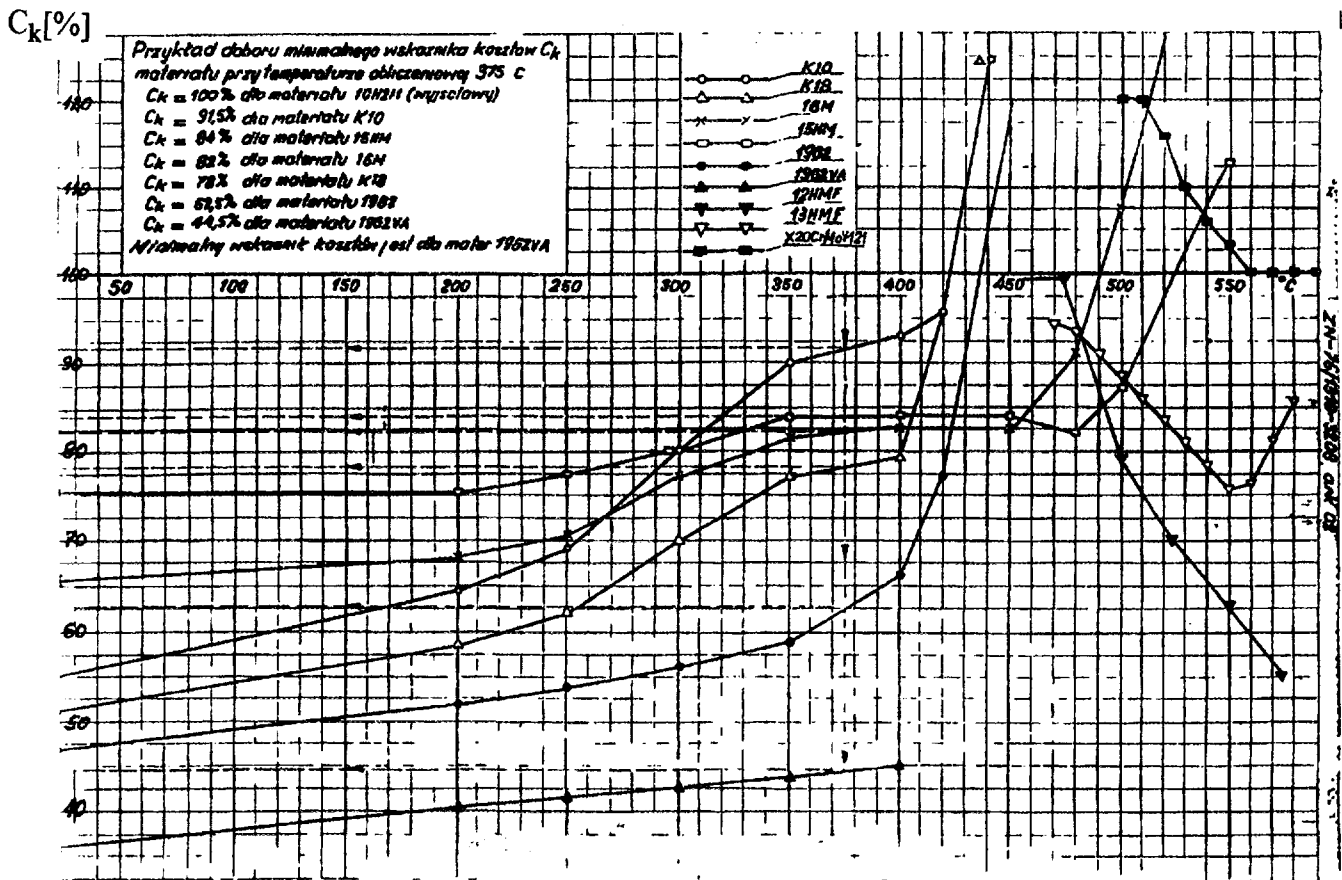
W zakres wdrożenia wchodzi między innymi opanowanie w sposób powtarzalny wszystkich parametrów występujących w stosowanych do realizacji obiektu operacjach technologicznych. Wchodzi one w zakres następujących najczęściej stosowanych w produkcji kotłowej technik:

- cięcie i obróbka skrawaniem (cięcie na zimno, toczenie, wiercenie itp),
- obróbka plastyczna na zimno (gięcie, doginanie, odginanie, spęczanie, tłoczenie, butelkowanie, itp),
- obróbka plastyczna na gorąco (zakres taki jak przy obróbce plastycznej na zimno z uwzględnieniem wpływu temperatur na wyrób),
- spawanie (dobór techniki, parametrów spawania i cięcia na gorąco, dobór materiałów spawalniczych i pomocniczych, ustalenie potrzeby i rodzaju zabiegów pomocniczych),
- obróbka cieplna (międzyoperacyjna i końcowa, parametry, dobór urządzeń, kolejność zabiegów).

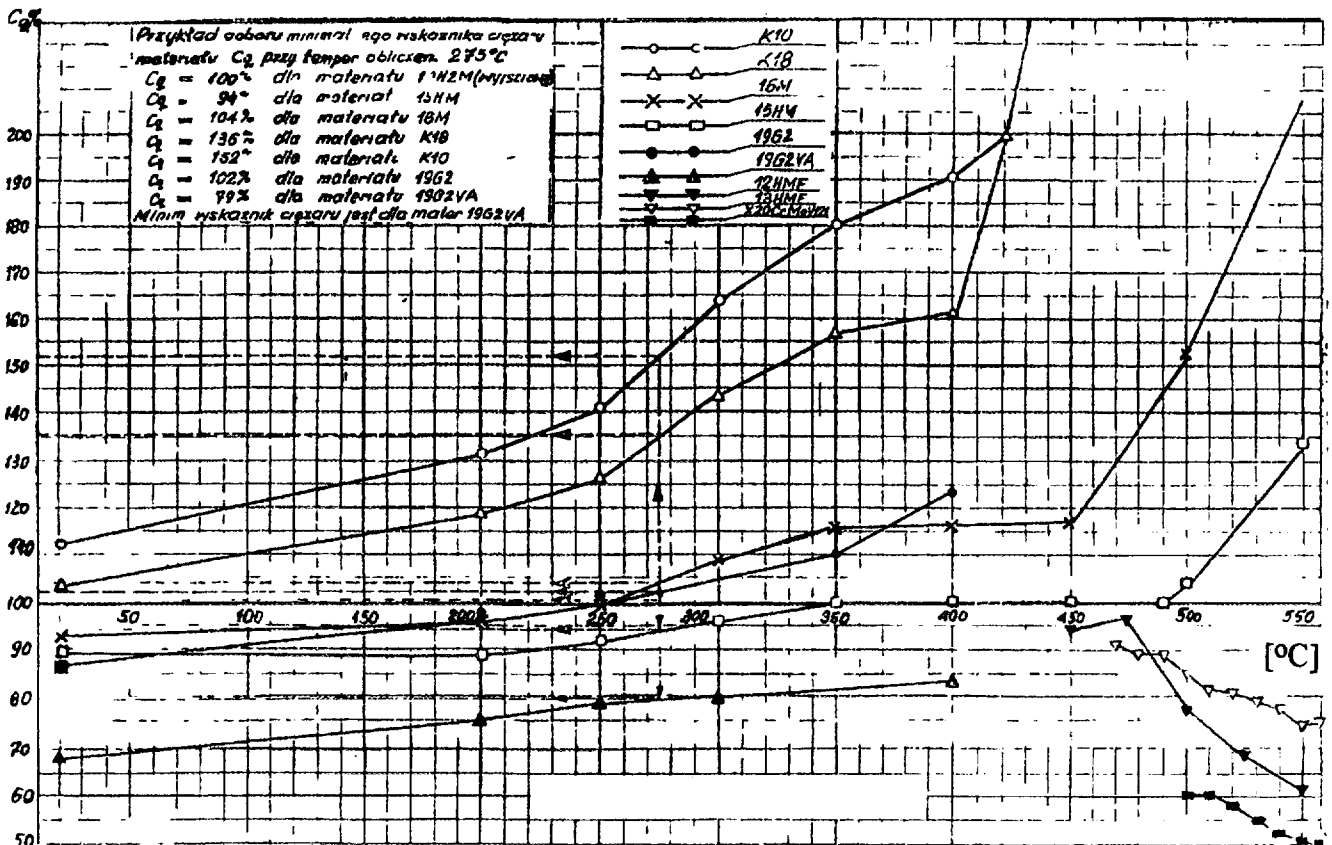
Dużym ułatwieniem dla tych działań jest kompletność charakterystyki nowego materiału, tzn. określenie zalecanych parametrów. Wtedy wdrożenie polega głównie na sprawdzeniu tych parametrów i określeniu marginesu dopuszczalnego błędu w realizacji warsztatowej. Jeśli nie ma określonych parametrów trzeba do nich dojść samemu - co niestety jest kosztowne i bardziej długotrwałe.

Po uznaniu okresu badawczego za zamknięty, trzeba powtórzyć wszystkie operacje pod nadzorem inspektora stosownego dozoru technicznego i uzyskać pisemne uprawnienie na stosowanie nowego materiału w produkcji elementów kotłowych. Dopiero w tym momencie wytwórca może przystępować do realizacji konkretnego zamówienia z użyciem nowego materiału, oczywiście pod nadzorem dozoru technicznego.

Tak w telegraficznym skrócie przedstawia się proces wdrażania nowego materiału. Niestety realizacja takiego wdrożenia wymaga czasu (liczonego w miesiącach) i pieniędzy, które nie zwrócą się przy braku zamówienia. Wyobrazić sobie można ile kosztuje wdrożenie jeśli przyjmiemy, że jedna średnia godzina w sprzedaży zbliża się ceną do kwoty bliskiej 40 zł. Wspomnę, że w ramach podjętej w latach 70-tych produkcji dla energetyki jądrowej wykonano w RAFAKO wdrożenia stali K22MA od podstaw. Nazywał się ten proces atestacją. Pracowało nad nim kilka instytutów branżowych, uczelni, hut i RAFAKO pod nadzorem UDT i licencjodawcy. Powstałe dokumenty zajęły kilka szaf i poszły na makulaturę, a wdrożenie skończyło się zaawansowaną produkcją skazaną na złom po odwołaniu budowy w Żarnowcu.



Rys. 4. Minimalne wskaźniki kosztów dla rur kotłowych



Rys. 5. Wskaźniki ciężaru dla rur kotłowych

4. OBECNA SYTUACJA EKONOMICZNO-FINANSOWA A NOWE WDROŻENIA

O niektórych utrudnieniach we wdrażaniu nowych stali do produkcji kotłów w obecnym okresie transformacji gospodarki w kraju wspomniałem już wyżej. Jednak decydująca rola czynników ekonomiczno-finansowych na podjęcie i ukończenie wdrożenia, skłania do bliższego przyjrzenia się tym czynnikom.

Najpierw wspomniałem o rozdrobnieniu kapitału na skutek rozbicia scentralizowanych organizacji w postaci zjednoczeń czy branż. Zniknęły wieloletnie plany wraz z pieniędzmi na ich realizację. Zamiast planów posługujemy się prognozami. Zdobywanie pieniędzy urosło do sztuki znacznie ważniejszej od rodzimego rozwoju technicznego jako, że nie żyje się już po to żeby pracować, a pracuje się żeby żyć i to możliwie najlepiej. Każde droższe zamierzenie nie będzie realizowane bez "biznes planu" określającego straty i zyski oraz zawierającego szczegółowo ustalone finansowanie, zależności wzajemne i ryzyko strat. Stąd służby marketingowe zepchnęły służby techniczne do roli wykonawców. Daleko nam do sytuacji, w której innowator techniczny jest pieszczonej przez służby handlowe jako źródło pomysłów na następne pieniądze.

Świadectwem obecnego stanu są zatory i brak płynności finansowej w przemyśle. W wyniku czego zamiast księgować zyski, księguje się i bilansuje zadłużenia. Powstają łańcuchy dziwnych zależności, np. elektrownia nie płaci kopalni za węgiel spalany w kotle, a kopalnia elektrowni za prąd (przy czym nie chodzi tu o wymianę barterową).

Żeby przedsiębiorstwo nie musiało zatrudniać służb handlowych zajmujących się dystrybucją swoich produktów, często powołuje samodzielne przedstawicielstwa na dany kraj lub zawiera umowy z pośrednikami. Szanse negocjowania ceny w takim przypadku są znikome jako, że cenotwórczy producent daje swoją cenę z zyskiem, a pośrednik tą cenę powiększa o koszty własne i marżę. Zamyka się jakby droga obniżania kosztów produkcji poprzez zakup tańszego materiału. Dla przykładu podam kilka aktualnych cen w przeliczeniu na 1 kg i 1 mb:

- stal 15Mo3(16HM), rura $\phi 38 \times 3,2$ - 1 kg cena 2,77zł - (2,77 kg/mb-cena 11,60 zł/mb),
- stal St45.8(K18), rura $\phi 193,7 \times 12,5$ - 1 kg cena 3,60zł - (56,2 kg/mb-cena 202 zł/mb),
- stal 13CrMo44(15HM), rura $\phi 323,9 \times 25$ - 1 kg cena 5,65zł - (186 kg/mb-cena 1050 zł/mb).

Jeśli wytwórca kotłów energetycznych do ich produkcji musi kupić setki różnych asortymentów, a każdy asortyment przez innego pośrednika, gdy na dodatek angażuje swój kapitał w drogie inwestycje, to albo podniesie cenę wyrobów i wypadnie z konkurencji, albo znajdzie sposób na zdobycie kapitału kontraktami z bogatym inwestorem.

W energetyce (tej rozdrobnionej i pozbawionej funduszy inwestycyjnych) często modernizacje prowadzi się na poczet przyszłych zysków ze sprzedaży energii. Ale na wykonanie zamierzenia pieniądze są potrzebne od zaraz. Czekanie na spłatę dla inwestora jest zamrożeniem kapitału obrotowego, zatem dla osiągnięcia w perspektywie długoletniej zysku, kapitał ten musi być odpowiednio wysoko oprocentowany. Tym sposobem obydwie strony (inwestor i wykonawca) faktyczne są zadłużone, a zadłużenie spłaca odbiorca prądu dostarczanego przez dwie inne firmy zajmujące się rozprowadzaniem energii i rozliczaniem z odbiorcą.

Rozdrobnienie wielkich organizacji gospodarczych miało na celu zwiększenie efektywności gospodarowania. Założono, że niegospodarni będą upadać, a że mali, to i koszty społeczne tego upadku nie będą wielkie. jednak nikt jakoś nie przewidział, że drogą pośrednictwa można doskonale podnosić ceny, a koszty ponoszone są przez całe, nie najbogatsze

społeczeństwo, niezależnie od podatków. Dlatego przytoczyłem wcześniej przykład ceny godziny pracy w sprzedaży (obejmującej koszty, płace, podatek i składkę na ZUS).

Trzeba odtwarzać majątek i prowadzić inwestycje dla postępu cywilizacyjnego - a to wymaga kapitałów, a nie długów. Dlatego trzeba uparcie wypracowywać nowe sposoby inwestowania, nie prowadzące do klinczu finansowego.

Nie można realnie zakładać, że wytwórca kotłów energetycznych będzie swój kapitał angażował w badania podstawowe produktów hutnictwa krajowego, jeśli stanie przed koniecznością zastosowania nowej stali. RAFAKO w takiej sytuacji z pewnością zwróci się do oferenta z doświadczeniem i posiadającego pełną wiedzę w zakresie technologii przetwórstwa. Przyspieszy to prace dopuszczeniowe (zdobycie uprawnienia dozoru technicznego) i ograniczy wydatki do niezbędnego minimum. Czynnikiem czasu obwarowany warunkami dostawy - to też pieniądze.

Powyższy rozdział nie powinien sugerować narzekania. Jest on próbą wykazania konieczności racjonalnego podejścia do zagadnień wdrażania nowości i poszukiwania najmniej finansowo uciążliwego wyjścia w warunkach jakich jesteśmy. Rozwoju uniknąć się nie da.

5. LITERATURA

1. J.F.Kuraś, D.Tomas, T.Wała: Program rozwoju wyrobów do roku 2000. Anex nr 1, 1995, RAFAKO S.A. (nie publikowane)
2. T.Malkiewicz: Metaloznawstwo stopów żelaza. PWN 1978.
3. Instytut Metalurgii Żelaza im.S.Staszica w Gliwicach: Charakterystyki stali. Stałe do pracy w temperaturach podwyższonych i obniżonych. Seria D.T.1, Cz.1. Wyd.Śląsk 1978.