
PIOTR MARUSZEWSKI

Zakład Technologii Chemicznej, Politechnika Radomska, Radom

Obróbka powierzchniowa energetycznych rurociągów jądrowych giętych na giętarkach ze strefowym nagrzewaniem indukcyjnym

Wprowadzenie

Celem pracy było opracowanie metody zabezpieczenia przed wtórnym promieniowaniem radiacyjnym rurociągów giętych ze strefowym nagrzewaniem indukcyjnym przeznaczonych dla energetyki jądrowej.

Zabezpieczenie realizowano przez usuwanie warstwy w postaci wtrąceń węglowych, tlenków metali powstających w czasie nagrzewania, gięcia i innych operacji technologicznych.

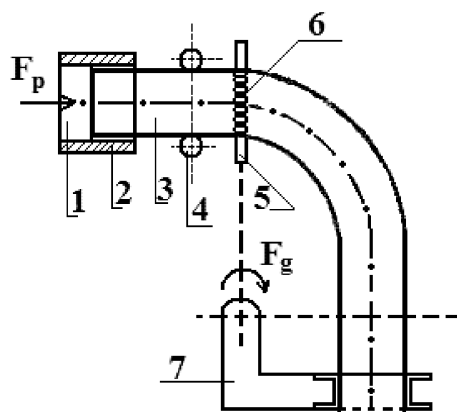
Pozostawienie warstwy zendry powoduje generowanie wtórnego promieniowania gamma i promieniotwórczego izotopu węgla ^{14}C na powierzchniach rurociągów [1÷3]. Szkodliwość tego promieniowania jest znana [4÷6].

Zastosowanie giętarek do gięcia z nagrzewaniem indukcyjnym jest znaczącym postępem w technologii gięcia rur energetycznych i różni się zasadniczo od gięcia na giętarkach konwencjonalnych typu GHR. W przypadku gięcia na giętarkach GHR rura jest cała nagrzewana (900÷1000°C) w piecach gazowych lub elektrycznych, a proces gięcia jest szybki (trwa kilka do kilkunastu minut). Natomiast na giętarkach indukcyjnych nagrzewany jest tylko wąski pas obwodu rury (30÷50

mm), gięcie jest powolne (trwa kilka godzin)*, przy czym nagrzewanie jest równoczesne z gięciem. Długi czas gięcia powoduje, że zużycie energii jest znacznie większe niż w przypadku gięcia na giętarce GHR. Jest to jednak nieuniknione, gdyż giętarka indukcyjna przeznaczona jest do gięcia rur o większych średnicach (od ok. 300 do 1000 mm). Gięcie indukcyjne zapobiega pękaniu rur, zafałdowaniu ścianek i zniekształceniu przekroju poprzecznego. Trudno jest zapobiegać tym szkodliwym zjawiskom na giętarce GHR przy gięciu rur o ϕ powyżej ok. 300 mm i grubszych ściankach. Wpływa to również na jakość i właściwości powstającej warstwy wierzchniej składającej się z tlenków metali, wtrąceń węglowych w postaci grafitu, sadzy i innych zanieczyszczeń oraz wymaga się opracowania metod ich usuwania.

Technologiczny proces gięcia rur na giętarkach ze strefowym nagrzewaniem indukcyjnym

Technologiczny przebieg gięcia rur na giętarkach ze strefowym nagrzewaniem indukcyjnym przedstawiono w ogólnym zarysie na rys. 1. Istota metody polega na nagrzewaniu wąskiego pasa rury (30÷50 mm) prądami wielkiej częstotliwości za pomocą induktora w kształcie pierścienia (Rys. 1).



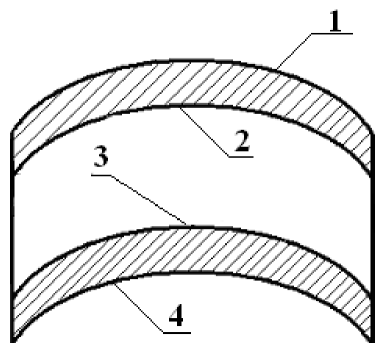
Rys. 1. Gięcie rur za pomocą giętarki z nagrzewaniem indukcyjnym: 1 – element mocujący (popychacz rury), 2 – przewodnice mechaniczne posuwowe, 3 – gięta rura, 4 – rolki prowadzące, 5 – induktor, 6 – miejscowa strefa nagrzewania i kształtowania, 7 – ramię kształtujące wraz z mechanizmem mocującym prawy koniec rury, F_p – siła popychająca, F_g – siła gnąca

Rura jednym końcem jest zamocowana w uchwycie ramienia obrotowego urządzenia, służącego do nastawiania promienia gięcia, a drugim w uchwycie urządzenia pchającego. Zginanie rury zachodzi w strefie nagrzewania. Rura jest przepychana osiowo przez induktor ze stałą prędkością. Strefa nagrzewania, a tym samym i strefa gięcia przemieszczają się po rurze wraz z jej przesuwem powodując powstawanie jej zgiętego odcinka [7].

Proces ten zdecydowanie różni się do gięcia rur na giętarce GHR, w których cała rura nagrzewana jest w piecach gazowych lub elektrycznych. Następnie umieszczana jest w łukowych obejmach rodzaju matrycy. Proces gięcia jest szybki tak, aby temperatura rury nie spadła poniżej ok. 850°C, natomiast przy gięciu ze strefowym nagrzewaniem nagrzewany pas wynosi 30÷50 mm, a proces gięcia jest stosunkowo bardzo wolny (z szybkością 10÷20 mm/min [8]).

Przeprowadzone eksperymenty

Eksperymenty obróbki powierzchniowej prowadzono na grubościennych rurach wykonanych ze stali stopowych. Gięcie prowadzono na giętarcie indukcyjnej typu PB-1000 w temperaturze strefy nagrzewania 900–1000°C [8]. Po zakończeniu procesu gięcia i obróbce cieplnej rury poddawano obróbce powierzchniowej takimi samymi metodami, jak w przypadku rur



Rys. 2. Powierzchnie podlegające oczyszczaniu; 1 – łuk zewnętrzny zewnętrznej (strefa rozciągania), 2 – łuk zewnętrzny wewnętrznej (strefa spęczniania), 3 – łuk wewnętrzny wewnętrznej (strefa rozciągania), 4 – łuk wewnętrzny zewnętrznej (strefa spęczniania)

giętych na giętarcie GHR a więc, szlifowaniu, trawieniu w kwasach i pastami oraz obróbce hydrościernej [9]. Ze względu na różne właściwości powierzchniowej warstwy tlenkowej stosowano różne metody obróbki na powierzchniach zewnętrznych i wewnętrznych (strefy spęczniania, rozciągania) jak przedstawiono na rys. 2. Po każdej operacji dokonywano pomiaru stopnia czystości powierzchni w miejscach pokazanych na rys. 3.



Rys. 3. Miejsca pomiaru wartości W_i i Y_i

Do pomiaru stopnia czystości a więc stopnia usunięcia zendry użyto spektrofotometru reemisyjnego z systemem CIELAB [10÷11]. Czystość powierzchni określano wskaźnikami białości W_i i żółknienia Y_i w 100-stopniowej skali CIELAB. Wyniki badań porównywano z rezultatami osiągniętymi na rurach giętych na giętarcie GHR i przedstawiono je w postaci tablic 1÷12.

Analiza i interpretacja wyników

Powierzchnie zewnętrzne

W strefie spęczniania na łuku wewnętrznym:

Porównując jakość powierzchni rur giętych na giętarcie indukcyjnej i GHR zaobserwowano:

- Po szlifowaniu uzyskano średnie wartości wskaźników W_i o 35%, a Y_i 50–60%, wyższe, niż analogiczne wskaźniki uzyskane na rurach giętych na giętarcie GHR. Równocześnie obserwuje się znacznie mniejszy rozrzut tych wartości: W_i 46-65 dla giętarki indukcyjnej 22,2–70,3 dla GHR, a Y_i odpowiednio 14,6-21,1 i 17,2-36,6 (Tabl. 1). Wskazuje to na większą jednolitość struktury zendry, mniejszą twardość i przyczepność do podłoża a co najistotniejsze mniejszą zawartość węgla.
- Po trawieniu w kwasach uzyskano średnie wartości W_i 73,8 i 57,8 oraz Y_i 8,7 i 12,8. Obserwuje się również znacznie mniejszy rozrzut tych wartości: W_i 67,4–82,0 i 40,1–77,3 dla giętarki GHR, a Y_i odpowiednio 9,9–7,8 i 18,3-8,5. Znaczny wzrost wskaźnika W_i (57,8 do 73,8) oraz spadek wartości Y_i (17,8–8,7) świadczy o znacznie większej podatności pozostałej warstwy zendry na działanie kwasów, mniejszą przyczepność do podłoża wtrąceń węglowych, większe rozproszenie ich w warstwie tlenkowej.
- Po obróbce pastami bez naświetlania i z naświetlaniem promieniami UV obserwuje się już stosunkowo nieduży wzrost wskaźników W_i (z ok. 74 do 78, a po naświetleniu do 80). Oczywiście uzyskuje się znacznie lepszy końcowy wynik W_i 80,4 w porównaniu do 72,6 dla giętarki GHR. Natomiast innym charakterystycznym zjawiskiem jest to, że w przypadku obróbki pastami z naświetlaniem promieniami UV rur giętych na GHR uzyskuje się stosunkowo większy postęp tj.

Tablica 1

Porównanie wskaźników W_i i Y_i rur giętych na giętarkie GHR i indukcyjnej na powierzchni zewnętrznej w strefie łuku wewnętrznego (spęcznianie) po szlifowaniu

Miejsce pomiaru	Giętarka GHR		Giętarka indukcyjna	
	W_i	Y_i	W_i	Y_i
1.	27,1	18,4	48,1	15,1
2.	49,2	30,2	46,0	14,6
3.	22,0	21,4	50,4	16,3
4.	70,3	25,2	55,2	17,1
5.	31,0	17,2	59,6	19,8
6.	69,2	32,6	53,1	19,4
7.	41,2	31,8	47,1	15,2
8.	22,2	28,1	64,4	20,2
9.	42,1	28,7	65,2	21,1
10.	37,9	36,6	61,3	19,6
średnia	41,2	27,1	55,0	17,8

Tablica 4

Porównanie wartości W_i i Y_i rur giętych na giętarkie GHR i indukcyjnej na powierzchni zewnętrznej łuku wewnętrznego (spęcznienie) po obróbce pastami z naświetlaniem promieniami UV

Miejsce pomiaru	Giętarka GHR		Giętarka indukcyjna	
	W_i	Y_i	W_i	Y_i
1.	62,6	7,7	70,2	7,1
2.	81,7	10,4	77,7	7,6
3.	58,8	7,6	86,2	7,5
4.	84,2	8,4	77,4	8,1
5.	60,7	9,6	68,4	7,7
6.	63,0	7,5	75,8	7,8
7.	80,4	9,4	84,8	7,6
8.	84,6	8,4	78,2	8,5
9.	77,8	9,8	90,8	8,0
10.	67,7	9,7	90,7	8,1
średnia	72,6	8,7	80,4	7,8

Tablica 2

Porównanie wskaźników W_i i Y_i rur giętych na giętarkie GHR i indukcyjnej na powierzchni zewnętrznej w strefie łuku wewnętrznego (spęcznianie) po trawieniu

Miejsce pomiaru	Giętarka GHR		Giętarka indukcyjna	
	W_i	Y_i	W_i	Y_i
1.	58,9	8,5	67,4	8,3
2.	75,2	16,8	76,5	7,9
3.	49,1	8,8	78,2	8,4
4.	77,3	16,1	69,5	9,6
5.	42,2	8,6	66,2	8,6
6.	45,4	10,8	74,3	7,8
7.	76,3	13,8	73,5	8,2
8.	72,4	18,8	70,7	8,6
9.	40,1	12,1	80,9	9,9
10.	40,9	14,2	82,0	9,8
średnia	57,8	12,8	73,8	8,7

Tablica 5

Porównanie wartości W_i i Y_i dla giętarki GHR i indukcyjnej dla powierzchni zewnętrznej łuku zewnętrznego (rozciąganie) po trawieniu

Miejsce pomiaru	Giętarka GHR		Giętarka indukcyjna	
	W_i	Y_i	W_i	Y_i
1.	60,2	8,7	69,0	9,2
2.	76,6	10,6	68,1	8,8
3.	52,6	7,7	71,4	8,5
4.	81,4	10,8	69,6	7,8
5.	44,6	8,8	73,8	8,0
6.	50,2	10,8	69,2	7,8
7.	78,8	10,7	70,2	8,4
8.	78,2	11,8	73,4	8,6
9.	67,7	10,9	71,8	7,0
10.	74,4	11,3	68,2	7,9
średnia	65,5	10,1	70,5	8,2

Tablica 3

Porównanie wskaźników W_i i Y_i rur giętych na giętarkie GHR i indukcyjnej na powierzchni zewnętrznej łuku wewnętrznego (spęcznianie) po obróbce pastami

Miejsce pomiaru	Giętarka GHR		Giętarka indukcyjna	
	W_i	Y_i	W_i	Y_i
1.	60,8	8,5	68,8	7,1
2.	78,6	12,2	77,6	7,7
3.	52,5	12,0	86,3	7,5
4.	80,2	10,8	77,1	8,2
5.	45,1	9,7	68,1	7,9
6.	49,0	10,6	75,7	7,8
7.	79,6	11,6	74,6	7,7
8.	80,8	9,6	78,0	8,6
9.	70,2	10,1	87,1	9,7
10.	71,4	10,8	88,2	8,8
średnia	66,8	10,6	78,1	8,1

Tablica 6

Porównanie wartości W_i i Y_i dla giętarki GHR i indukcyjnej dla powierzchni zewnętrznej łuku zewnętrznego (rozciąganie) po obróbce hydrościernej

Miejsce pomiaru	Giętarka GHR		Giętarka indukcyjna	
	W_i	Y_i	W_i	Y_i
1.	68,2	7,7	76,1	7,1
2.	80,2	9,3	80,1	7,8
3.	80,4	8,2	82,6	7,5
4.	73,6	7,2	79,2	6,7
5.	66,7	8,2	84,1	7,2
6.	65,2	7,4	77,4	7,0
7.	74,6	9,1	79,3	7,4
8.	73,6	7,9	83,5	6,8
9.	77,8	7,1	82,4	7,2
10.	79,6	7,0	78,0	6,9
średnia	73,8	8,0	80,0	7,0

Tablica 7

Porównanie wartości W_i i Y_i dla giętarki GHR i indukcyjnej dla powierzchni zewnętrznej łuku zewnętrznego (rozciąganie) po obróbce pastami

Miejsce pomiaru	Giętarka GHR		Giętarka indukcyjna	
	W_i	Y_i	W_i	Y_i
1.	80,6	6,8	85,0	7,2
2.	87,8	8,4	85,2	7,0
3.	79,8	7,3	84,7	6,1
4.	71,4	6,9	80,2	7,1
5.	87,6	7,5	81,5	7,7
6.	70,3	5,8	86,5	6,2
7.	84,8	7,4	79,6	6,8
8.	73,4	6,8	83,5	7,1
9.	83,4	5,8	79,2	7,3
10.	78,6	7,8	84,6	6,9
średnia	79,8	7,1	83,1	7,0

Tablica 10

Porównanie wartości W_i i Y_i dla giętarki GHR i indukcyjnej dla powierzchni wewnętrznej łuku wewnętrznego (rozciąganie) po obróbce hydrościernej

Miejsce pomiaru	Giętarka GHR		Giętarka indukcyjna	
	W_i	Y_i	W_i	Y_i
1.	62,2	9,4	76,1	7,9
2.	79,4	9,8	74,0	8,1
3.	55,0	8,4	75,2	7,6
4.	80,8	9,6	76,6	8,0
5.	47,2	7,6	80,3	7,2
6.	51,2	9,7	72,7	7,7
7.	81,2	8,5	75,4	7,5
8.	71,1	7,7	79,6	8,1
9.	75,8	10,9	74,4	7,9
10.	79,1	10,1	78,1	7,1
średnia	68,3	9,2	76,3	7,7

Tablica 8

Porównanie wartości W_i i Y_i dla giętarki GHR i indukcyjnej dla powierzchni zewnętrznej łuku zewnętrznego (rozciąganie) po obróbce pastami z naświetlaniem UV

Miejsce pomiaru	Giętarka GHR		Giętarka indukcyjna	
	W_i	Y_i	W_i	Y_i
1.	86,2	6,6	81,6	6,5
2.	91,1	6,8	80,1	6,7
3.	78,2	5,9	87,5	5,8
4.	77,7	5,5	80,5	5,4
5.	90,2	6,1	86,1	6,1
6.	80,3	6,2	82,6	6,2
7.	92,4	6,4	85,5	5,6
8.	77,0	5,7	83,5	6,3
9.	74,2	7,1	86,8	7,2
10.	76,6	7,2	81,8	7,2
średnia	82,4	6,4	85,5	6,3

Tablica 11

Porównanie wartości W_i i Y_i dla giętarki GHR i indukcyjnej dla powierzchni wewnętrznej łuku zewnętrznego (spęcznianie) po trawieniu

Miejsce pomiaru	Giętarka GHR		Giętarka indukcyjna	
	W_i	Y_i	W_i	Y_i
1.	69,2	10,8	60,3	10,0
2.	76,4	14,7	60,1	10,1
3.	60,2	9,8	64,1	9,3
4.	77,1	14,8	65,6	10,8
5.	43,2	13,7	63,8	9,4
6.	48,4	8,8	67,2	9,6
7.	76,7	12,8	62,1	10,3
8.	72,6	14,9	66,4	9,7
9.	40,2	13,8	64,	9,5
10.	38,8	14,0	65,2	10,1
średnia	60,7	12,8	64,0	9,8

Tablica 9

Porównanie wartości W_i i Y_i dla giętarki GHR i indukcyjnej dla powierzchni wewnętrznej łuku wewnętrznego (rozciąganie) po trawieniu

Miejsce pomiaru	Giętarka GHR		Giętarka indukcyjna	
	W_i	Y_i	W_i	Y_i
1.	45,2	13,2	63,1	8,2
2.	46,8	11,1	67,0	8,0
3.	74,1	17,7	69,8	9,4
4.	77,0	18,8	65,2	8,7
5.	49,4	10,2	70,0	8,2
6.	44,2	8,4	70,4	9,1
7.	78,3	9,8	65,4	9,8
8.	60,6	8,7	67,7	8,8
9.	77,4	15,8	68,6	9,7
10.	70,2	8,3	66,4	8,1
średnia	62,2	11,6	67,4	8,8

Tablica 12

Porównanie wartości W_i i Y_i dla giętarki GHR i indukcyjnej dla powierzchni wewnętrznej łuku zewnętrznego (spęcznianie) po obróbce hydrościernej

Miejsce pomiaru	Giętarka GHR		Giętarka indukcyjna	
	W_i	Y_i	W_i	Y_i
1.	66,5	9,1	72,0	7,6
2.	77,0	9,6	78,1	7,4
3.	81,5	9,2	70,2	7,4
4.	79,2	9,3	72,4	8,0
5.	63,1	7,4	71,0	7,0
6.	59,7	9,5	77,6	8,4
7.	82,7	8,3	76,2	8,0
8.	57,4	7,5	73,4	7,3
9.	70,1	6,1	72,1	7,8
10.	65,2	6,0	74,6	7,2
średnia	70,4	8,1	73,8	7,6

wzrost wskaźnika W_i z ok. 58 do 67, a po naświetleniu do 72,6. Natomiast wskaźniki Y_i dla obu przypadków różnią się stosunkowo niewiele i wynoszą odpowiednio 8,1–7,8 i 16,6–8,7.

W strefie rozciągania na łuku zewnętrznym:

- Po trawieniu w kwasach uzyskano średnie wskaźniki W_i 70,5 i 65,5, Y_i 8,2 i 10,1. Rozrzut wyników jest mniejszy, niż w strefie spęczniania.
- Po obróbce hydrościernej W_i wynosi 30,2 i 73,8, a Y_i 7,1 i 8,0.

Powierzchnie wewnętrzne

W strefie rozciągania na łuku wewnętrznym:

- Po trawieniu uzyskano średnie wartości W_i 67,4 i 62,2, a Y_i odpowiednio 8,8 i 11,6.
- Po obróbce hydrościernej uzyskano $W_{i(\text{ind})}$ 76,3 $W_{i(\text{GHR})}$ 68,2, a Y_i 7,7 i 9,2.

W strefie spęczniania na łuku zewnętrznym:

- Po trawieniu uzyskano W_i 64,1 i 60,7, a Y_i odpowiednio 9,8 i 12,0.
- Po obróbce hydrościernej uzyskano W_i 73,8 i W_i 64,1, a Y_i odpowiednio 7,6 i 8,1. Różnica rozrzutu wyników w obu przypadkach jest mała. Obróbka hydrościerna powierzchni wewnętrznych jest trudniejsza niż zewnętrznych ze względu na utrudniony dostęp strumienia ścierniwa. Zależy w dużym stopniu od średnicy, długości rury, kąta i promienia gięcia.

Podsumowanie

Gięcie na giętarcie indukcyjnej ułatwia obróbkę powierzchniową, uzyskuje się wskaźniki W_i i Y_i 40–50% korzystniejsze niż w przypadku obróbki po gięciu na giętarcie GHR. Powstająca warstwa zendry zawiera znacznie mniej wtrąceń węglowych i tlenków metali jest słabiej związana z podłożem, bardziej podatna na działanie kwasów i łatwiej usuwalna przez szlifowanie i obróbkę strumieniowo ścierną [12]. Wynika to z odmiennej technologii gięcia i sposobu nagrzewania. Nagrzewany jest wąski pas rury o szerokości 30÷50 mm w odróżnieniu od nagrzewania całej rury w piecach gazowych przy gięciu na giętarkach GHR. Czas gięcia na giętarkach GHR jest krótki kilka minut a na indukcyjnej nawet kilka godzin. Oprócz tego nie ma kontaktu powierzchni giętej rury z induktorem jak to ma miejsce przy gięciu na GHR gdzie występują duże siły nacisku na obejmę (rodzaj matrycy) giętej rury [13, 14].

Wnioski

1. Zastosowanie giętarki indukcyjnej ułatwia zdecydowanie obróbkę powierzchniową w porównaniu z giętarką GHR. Po wstępnym szlifowaniu i trawieniu uzyskuje się wskaźniki W_i i Y_i o ok.40–50% korzystniejsze ponieważ powstająca zendra jest bardziej podatna na działanie kwasów i łatwiejsza do usunięcia przez szlifowanie i obróbkę hydrościerną.
2. Zawartość wtrąceń węglowych jest znacznie mniejsza i są one słabiej związane z podłożem co ułatwia ich usunięcie.
3. Struktura powstałej zendry po gięciu indukcyjnym jest bardziej jednolita i równomiernie rozmieszczona na całych powierzchniach, co zmniejsza chropowatość powierzchni po jej oczyszczeniu.
4. Uproszczony jest proces technologiczny obróbki ponieważ nie ma konieczności stosowania dodatkowych operacji w postaci stosowania past trawiących z naświetlaniem promieniami UV, jak to ma miejsce w przypadku obróbki powierzchni po gięciu na giętarcie GHR.
5. Istnieje możliwość praktycznie całkowitej eliminacji tworzenia się warstwy tlenków na powierzchniach wewnętrznych giętych rur, poprzez zaślepienie końców rur i usunięcia powietrza przez wprowadzenie gazu obojętnego, np. argonu lub helu.

LITERATURA

1. Z Szeliński, E. Skrzypczak: Wstęp do fizyki jądra atomowego i cząstek elementarnych, PWN, Warszawa, 2002.
2. Z. Kleszczowski: Fizyka kwantowa, atomowa i ciała stałego, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1998.
3. Detectors and Nuclear Electronics in Medical Imaging BMD <http://www.nuclear.kth.se/courses/medphys/5A1414/Jan-2003/Detlab.pdf>
4. A.Z. Hrynkiewicz: Człowiek i promieniowanie jonizujące, PWN, Warszawa 2001.
5. A. Czerwiński: Blaski i cienie promieniotwórczości, Wydawnictwo: WSiP, Warszawa 1995.
6. A. Czerwiński: Energia jądrowa i promieniotwórczość, Wydawnictwo Oficyna Edukacyjna Krzysztof Pazdro, Warszawa 1998.
7. T. Jóźwik, A. Neimitz, J. Piszczek: Energetyka, nr 7 (1984).
8. M. Gajewski: Hutnik, nr 9, (1983).
9. P. Maruszewski: Inż. Ap. Chem., 46, nr 2, 18 (2007).
10. MiniScan XE – instrukcja firmy MiniScan 1995.
11. P. Maruszewski: Inżynieria Powierzchni, nr 4, (2004).
12. S. Mrowec: Kinetyka i mechanizm utleniania metali, Wydawnictwo Śląsk, Katowice, 1982.
13. M. Gajewski: Energetyka, nr 8 (1982).
14. S. Zdrodowski, B. Kwiatkowski: Energetyka, nr 6 (1978).