

## EWOLUCJA PROCESU ELEKTROSTALOWNICZEGO W HUCIE ZAWIERCIE

### *Evolution of Electric Steelmaking Process in Zawiercie Steelworks*

Mirosław WCIŚLIK  
Politechnika Świętokrzyska

Tadeusz WTOREK  
Huta Zawiercie

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono piec łukowy jako element ciągu produkcyjnego zakładu metalurgicznego. Omówiono rozwiązania techniczne pozwalające zintensyfikować produkcję pieca łukowego, wprowadzone w latach 1960–85 w stalowniach Europy Zachodniej. Podobne rozwiązania zastosowano w Hucie Zawiercie dopiero w latach 1990–96. Przedstawiono zmiany rocznych wskaźników eksploatacyjnych pieców łukowych w tych latach. Ich wartości są zbliżone do podobnych uzyskiwanych w najlepszych stalowniach świata. Na podstawie przebiegu wskaźników pieców stwierdzono, że istotne znaczenie miało zastosowanie żużla spienionego, przeniesienie wyrobienia do pieca kadziowego oraz zastosowanie tlenu gazowego w trakcie roztopiania i świeżenia. Zbadano relacje między średnią mocą wytopu, zużyciem energii w czasie wytopu oraz czasem pracy toru elektrycznego i czasem wytopu. Stwierdzono korelację między energią i czasem pracy toru elektrycznego.

**Summary:** In the paper an arc furnace is outlined as a component of the production line of a steelworks. The process developments allow the intensification of arc furnace productivity, introduced in 1960–85 in western Europe, and is discussed. Similar developments were applied in Zawiercie Steelworks in 1990–96. The changes of the annual operating results of the arc furnaces during those years are described. The value of the results are close to those of the best world steelworks. On the basis of the results of the furnaces, it was found that application of the foaming slag had the most important influence, and secondary metalurgy and use of the oxygen during melting and oxidation. The relation between the mean electric power of the heat, energy consumption of the heat versus time on load and time of heat were analysed. The correlation between energy consumption and time on load was found.

### 1. WPROWADZENIE

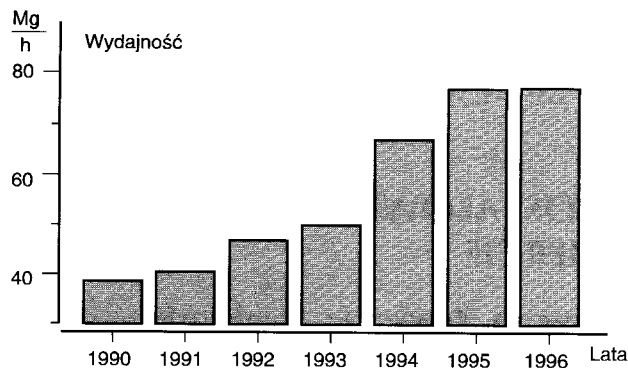
Instalacja produkcyjna zakładu metalurgicznego hutnictwa żelaza najczęściej zawiera:

- urządzenia do wytwarzania płynnej stali o zadanym składzie chemicznym i zadanej temperaturze,
- urządzenia lejnicze (odlewanie wlewków i instalacje ciągłego odlewania stali — COS).

Produkty z urządzeń lejniczych często są przekazywane bezpośrednio na walcownie, co pozwala uniknąć powtórnego rozgrzewania przed walcowaniem. Profil uformowany w krystalizatorze COS determinowany jest produkowanym asortymentem zakładu metalurgicznego. I tak, dla wytwarzania grubych blach może to być przekrój prostokątny, np. 1200 x 200 mm. Coraz częściej spotyka się urządzenia COS o stosunkowo małym przekroju, np. 100 x 100 mm. Tak mały przekrój wiąże się

z istotnym zmniejszeniem rozmiarów urządzeń lejniczych i stosowaniem ich w ramach modernizacji zakładów. Kolejną innowację techniczną stanowi urządzenie do ciągłego odlewania taśm. Urządzenie to łączy w sobie maszynę do ciągłego odlewania, piec indukcyjny oraz układ walców dogniatających do zadanej grubości taśmę. To tylko kwestia czasu, gdy zostanie dodane do tego ciągu pokrywanie taśm powłokami galwanicznymi i warstwami z tworzyw sztucznych.

Można uznać, że urządzenia lejnicze i walcownicze pracują w sposób ciągły, przelotowy. Urządzenia do roztopiania oraz wyrobienia stali najczęściej pracują cyklicznie, wsadowo. Okres wytopu stali, pojemność pieca oraz liczba pieców (najczęściej dwa) dobierane są tak, aby zapewnić ciągłą pracę urządzeń lejniczych i walcowniczych. Dla efektywnej eksploatacji instalacji zakładu istotna jest więc planowa, nie zakłócona i efektywna eko-



Rys. 1. Średnia produkcja roczna stalowni Huty Zawiercie w latach 1990–96

onomicznie realizacja procesu wytopu stali. Wiąże się to z unowocześnieniem procesu elektrostalowniczego.

Jednocześnie obserwuje się tendencję do zwiększania wydajności pieca łukowego, co przy stabilnym rynku pozwala na zwiększenie efektywności ekonomicznej stalowni, gdyż zmniejszana jest liczba pieców w ciągu produkcyjnym. Dzięki temu zmniejszają się koszty eksploatacji i robocizny. Tendencja taka obserwowana jest na wykresie średniej wydajności pieca łukowego elektrostalowni Huty Zawiercie w ostatnich latach (rys. 1).

Należy dodać, że początkowo, do 1992 roku, eksploatowano 4 piece; w 1993 i 1994 — trzy, a od 1995 tylko dwa piece. Świadczy to o istotnej poprawie organizacji technologii (intensyfikacji) produkcji stali w omawianym zakładzie. Metody intensyfikacji zostaną przedstawione w dalszej części pracy.

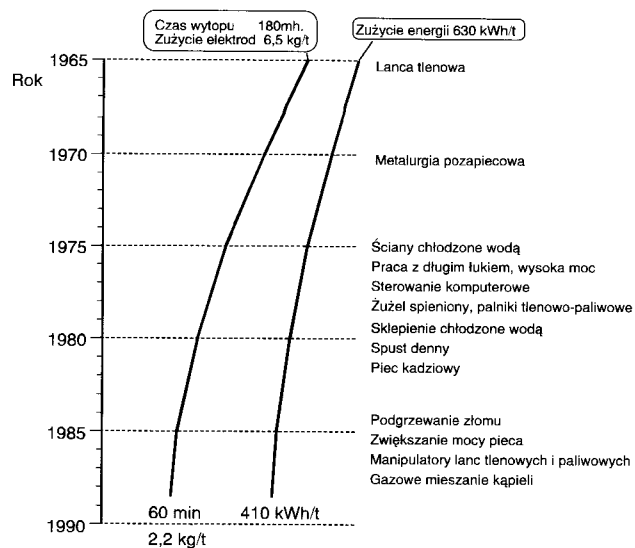
## 2. METODY ZWIĘKSZANIA EFEKTYWNOŚCI PROCESU ELEKTROSTALOWNICZEGO

Rozwiązania techniczne stosowane w stalowniach Europy Zachodniej w latach 1965–1990, pozwalające na zwiększenie efektywności wytopu stali w piecu łukowym, prezentowane są na rysunku 2 [2].

Wzrost efektywności wyrażony jest skróceniem czasu wytopu (wzrostem wydajności pieca), zmniejszeniem zużycia energii oraz zmniejszeniem zużycia elektrod na jednostkę produkcji. Zmniejszenie czasu wytopu należy wiązać:

- ze zwiększeniem mocy zasilania pieca, (moc transformatora, lance tlenowe i palniki paliwowo-tlenowe),
- ze zwiększeniem efektywności przekazywania energii do wsadu (praca z długim łukiem, stosowanie spieniania żużla),
- z obniżeniem temperatury końcowej wsadu i stosowaniem wyrabiania pozapiecowego,
- z poprawą organizacji wytopu.

Ten ostatni czynnik podkreśla znaczenie pracy obsługi (operatora) pieca łukowego. Na czas wytopu wpływa obciążenie cieplne ścian, sklepienia, czas naprawy pospustowej ścian, i częstość wymiany sklepienia. Zastosowanie ścian i sklepienia chłodzonych wodą istotnie zwiększyło ilość wytopów między remontami i wpłynęło na zmniejszenie średniego czasu naprawy pospustowej.



Rys. 2. Wpływ rozwiązań technologii na efektywność produkcji stali [2]

Koszt każdego przestoju (awarii urządzenia łukowego) można wyrazić w stratach wynikających z braku produkcji stali oraz utratą ciepła przez urządzenie łukowe. Procesy roztopiania wsadu i wyrabiania stali różnią się przebiegiem temperatury oraz ilością wykorzystywanej energii na jednostkę masy wsadu. Dlatego procesy te powinny być prowadzone w różnych urządzeniach. Proces roztopiania jest bardziej energochłonny i bardziej szkodliwie oddziałuje na środowisko niż proces wyrabiania. Jego wydłużenie bardziej zwiększa koszty produkcji zakładu niż wydłużenie procesu wyrabiania. Im krótszy jest proces roztopiania, tym mniejsze są straty ciepła i tym większa jest wydajność instalacji produkcyjnej. Dlatego obecnie roztopianie prowadzone jest w piecach łukowych, dla których iloraz mocy toru elektrycznego i pojemności może przekraczać 1000 kVA/Mg. Dla urownomierzenia rozkładu temperatury w piecu łukowym i dla wzrostu mocy całkowitej tego urządzenia stosowane są lance tlenowe i palniki tlenowo-paliwowe. Wyrabianie w piecu kadziowym pozwala na obniżenie temperatury końcowej wsadu roztopionego w piecu łukowym. Pozwala to na dalsze skrócenie czasu roztopiania i zmniejszenie strat cieplnych pieca.

Zużycie elektrod jest funkcją czasu wytopu, temperatury otoczenia elektrody oraz prądów łuków. Na rysunku 2 zużycie elektrod i czas wytopu przedstawiono jedną, tą samą krzywą. Na zużycie elektrod istotnie wpływa zastosowanie zewnętrznego chłodzenia (spryskiwania) wodą powierzchni bocznych elektrod.

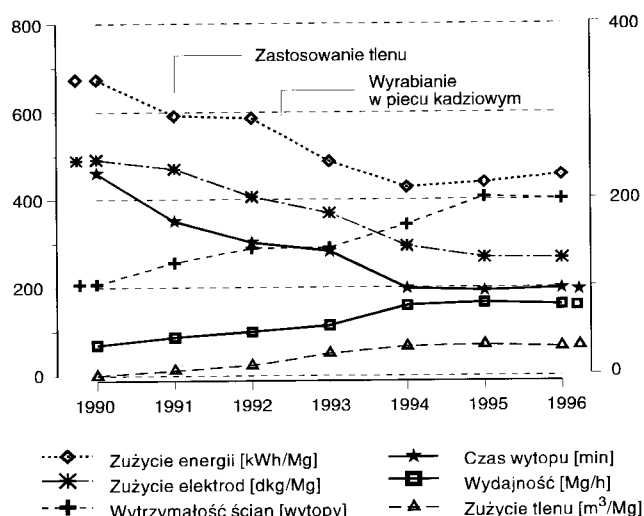
## 3. MODYFIKACJE PROCESU WYTOPU W HUCIE ZAWIERCIE NA TLE DANYCH EKSPLOATACYJNYCH

Rozwiązania techniczne stosowane w polskich hutach w znacznej mierze zależały od wielkości niezbędnych nakładów finansowych oraz stopnia ich skomplikowania. W procesie wyrabiania stali w piecach UHP, zakupionych w latach siedemdziesiątych, świeżenie realizowano

poprzez wrzucanie do kąpieli rudy żelaza. Metodę tę przestano stosować w stalowniach zachodnich około dziesięć lat wcześniej. Do realizacji świeżenia tlenem potrzebna była kosztowna, dodatkowa infrastruktura, która powstała dopiero kilka lat później. Stopień skomplikowania poszczególnych rozwiązań technicznych był decydujący o ich stosowaniu, gdyż realizowano je najczęściej własnymi siłami. Stąd stosunkowo wcześniej (lata osiemdziesiąte) wprowadzono chłodzenie wodne ścian. Podstawą były informacje uzyskane w czasie wizyt technicznych w zakładach metalurgicznych Europy Zachodniej.

Wydajność całości zakładu nie ukazuje wpływu poszczególnych rozwiązań. Widoczny jest on w przypadku poszczególnych pieców. Na rysunku 3 przedstawiono podstawowe dane eksploatacyjne pieca łukowego nr 1 w Hucie Zawiercie w latach 1990–96. Na instalacji tego pieca wypróbowywano nowe rozwiązania techniczne. Krzywe na rysunku 3 uwidoczniają wcześniejsze uwagi o wpływie poszczególnych czynników na efektywność ekonomiczną pieca. I tak podstawowym czynnikiem było zastosowanie tlenu. Reakcje egzotermiczne tlenu przyspieszają roztapianie, przy czym koszt tej dodatkowo wnoszonej energii jest prawie trzykrotnie niższy niż koszt energii elektrycznej. Należy dodać, że nie obserwowano tak silnego wpływu w przypadku zastosowania palników gazowo-tlenowych w 1992 roku, co można wytłumaczyć istotnym zwiększeniem ilości gazów wytwarzanych w komorze pieca i zwiększeniem przez to ilości ciepła unoszonego z gazami wylotowymi z pieca. Wraz z zastosowaniem tlenu wprowadzono automatyczne dozowniki do spieniania żużla, co pozwoliło na zwiększenie efektywności dostarczania energii elektrycznej do wsadu.

Istotne zmniejszenie zużycia energii uzyskano poprzez przeniesienie wyrobienia do pieca kadziowego wiosną 1993 roku. W tym czasie zmniejszono także reaktancje fazowe toru wielkopiętrowego (o ok. 10%), stosując przewodzące ramiona elektrod. Jednakże wpływ ten może osłabiać mniejsza stabilność łuków i większa dynamika zmian mocy czynnej dostarczanej do pieca łukowego.



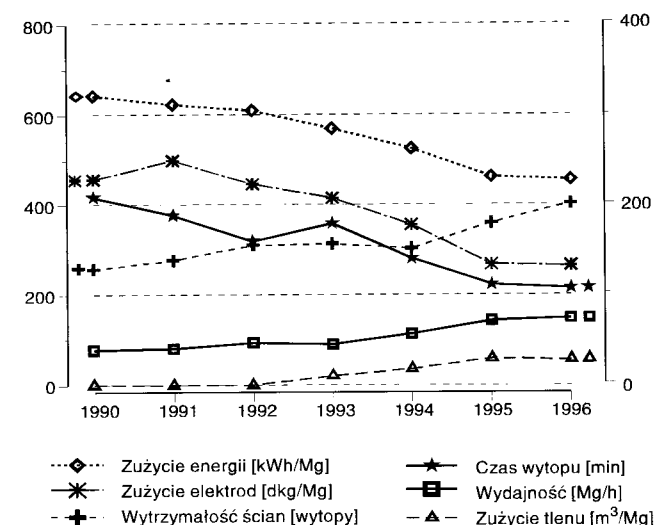
Rys. 3. Dane eksploatacyjne pieca łukowego nr 1 w Hucie Zawiercie w latach 1990–96

Część tych rozwiązań technicznych zastosowano następnie w piecu nr 3. Dane eksploatacyjne tego pieca przedstawiono na rysunku 4.

Przebieg danych eksploatacyjnych pieca nr 3 jest mniej regularny niż w przypadku pieca nr 1, zwłaszcza wykres czasu wytopu i zużycia elektrod. W 1993 średni czas wytopu był większy niż w 1992. Wynikało to z nierównomiernej wydajności poszczególnych elementów ciągu produkcyjnego. W tym czasie uruchomiony został dopiero jeden piec kadziowy i wytopy po roztopieniu były przetrzymywane w piecu łukowym. W omawianym okresie ponadto: zmieniono producenta elektrod, uruchomiono urządzenie do odzysku elektrod ze złamanych elektrod, zmodyfikowano program sterowania mocą pieca, dlatego trudno jest zidentyfikować bezpośrednią przyczynę zmiany zużycia elektrod, widocznego na rysunku 4.

Powyższe dane przedstawiają proces ogólnie, wskaźnikowo. Na tej podstawie można jedynie porównać realizacje sterowania wytopem. Na osiągnięcie powyższych wyników miała także wpływ ewolucja programu topienia w kierunku maksymalnego wykorzystania mocy transformatora, co stało się możliwe dzięki zastosowaniu spieniania żużla. W 1990 roku pracowano na czterech różnych odczepach transformatora. Obecnie, gdy w zasadzie wykorzystywany jest jeden odczep, moc średnia wzrosła o około 3 MW. Wpłynęło to zasadniczo na skrócenie czasu pracy toru elektrycznego i tym samym czasu wytopu. Jednocześnie zmniejszono prądy, przy zachowaniu zalecanej stabilności łuku. W efekcie zmniejszono zużycie elektrod.

Proces wytopu stali w piecu łukowym jest procesem cyklicznym wsadowym i wiąże się z szeregiem czynności pomocniczych, organizacyjnych. Najczęściej wsad ładowany jest do pieca trzema koszami. Roztapianie każdego z koszy można podzielić na co najmniej trzy etapy. W pierwszym wytapiane są studnie dla elektrod we wsadzie, tak aby chronić sklepienie i aby móc pracować w następnym etapie z długimi łukami i maksymalną mocą toru elektrycznego urządzenia łukowego. W drugim etapie występuje rozszerzanie wytopionej przestrzeni i jed-



Rys. 4. Dane eksploatacyjne pieca łukowego nr 3 w Hucie Zawiercie w latach 1990–96

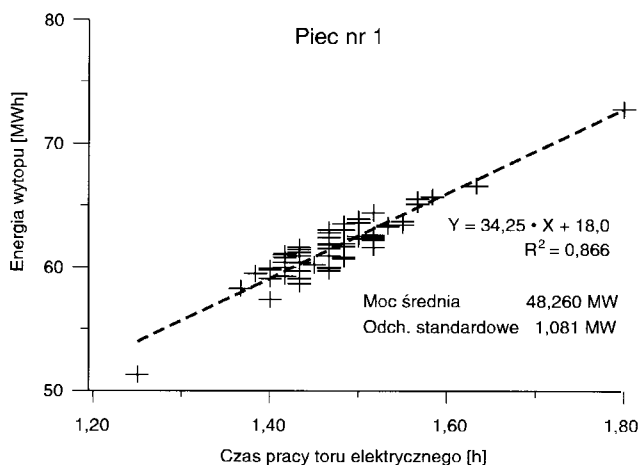
nocześnie tworzy się żużel. Żużel ten pozwala na ochronę ścian pieca i skierowanie większej ilości energii do płynnego wsadu w trzecim etapie. Granice między poszczególnymi etapami dla kolejnych koszy odmierzane są czasem lub ilością dostarczonej energii, zależnie od ilości i składu chemicznego wsadu i żużla. Sterowanie procesem wytopu realizowane jest w układzie otwartym, dlatego jest wrażliwe na zakłócenia. Zakłócenia te mogą dotyczyć gęstości wsadu, szczelności pieca, zmian strat ciepłych ścian i sklepienia, zmian natężenia przepływu tlenu itp. Instalacja pieca łukowego pod względem pomiarów ciepłych jest słabo oprzyrządowana. Dlatego proces doboru sterowań jest długotrwały i ma charakter ewolucji. Poszczególne programy sterowania mogą być oceniane z zastosowaniem przedstawionych wyżej wskaźników. Z etapowości sterowania wynika duże znaczenie czasu wykonania czynności organizacyjnych procesu. Przy obecnie osiągniętym czasie wytopu, równym około 99 minut, czas postoju wynosi średnio około 10 minut. Czas napraw średnio wynosi około 11 minut. Średni czas pracy toru elektrycznego może stanowić około 80% czasu wytopu, liczonego łącznie z postojami.

Dane wskaźnikowe opisują proces wytopu w sposób bardzo uśredniony. Opis ten można uszczegółowić, badając poszczególne wytopy. Instalacje pieców łukowych są stosunkowo słabo oprzyrządowane. Dlatego analizę tych danych należy realizować dla określenia kierunków optymalizacji sterowań. Badano relacje między następującymi wielkościami:

- moc średnia,
- energia zużyta w wytopie,
- czas pracy toru elektrycznego,
- czas wytopu obejmujący dodatkowo czas postoju i napraw.

Badając relacje między powyższymi zmiennymi stwierdzono, że istnieje pewna korelacja między energią a czasem pracy toru elektrycznego. Pozostałe związki miały niski (poniżej 0,5) współczynnik testu  $R^2$ . Dlatego niżej prezentowane są wykresy właśnie tej relacji dla obu pieców za okres 7–11 lutego 1996 roku (rys. 5, 6).

Na rysunkach 5 i 6 umieszczono relację między energią wytopu (Y) a czasem pracy toru elektrycznego (X).



Rys. 5. Relacja między czasem pracy toru elektrycznego a energią zużyta w trakcie wytopu dla pieca nr 1

Relacja ta jest spełniona przy znacznej wartości współczynnika  $R^2$ , co oznacza współczynnik korelacji powyżej 0,85. Współczynnik nachylenia w otrzymanym równaniu (mnożony przez X) ma charakter mocy i ma podobną wartość dla obu pieców. Istotne są różnice wartości średnich mocy uśrednionych dla poszczególnych wytopów. Moc ta decyduje o wartości czasu pracy toru elektrycznego. Moc średnia dla pieca nr 1 jest większa ze względu na mniejsze reaktancje toru wielkoprądowego po zastosowaniu ramion przewodzących.

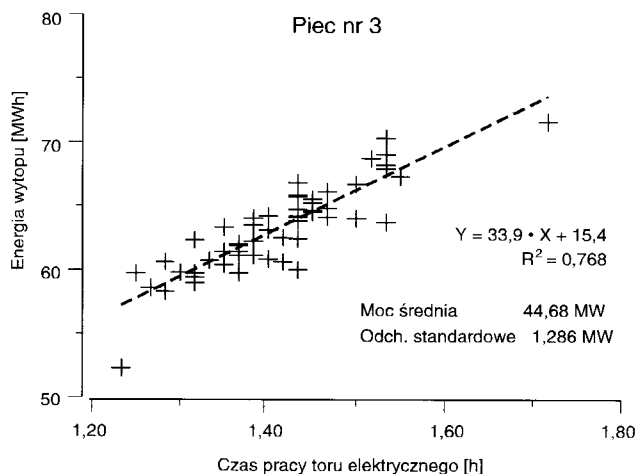
Uwzględniając, że oba piece powinny pracować przy podobnym prądzie, piec nr 1 pracuje z wydłużonym łukiem, co przy stosowaniu tego samego sterowania żużlem powoduje zwiększone straty energii. Stąd dla pieca nr 1 można mówić o mniejszej wartości współczynnika sprawności przekazywania energii elektrycznej do wsadu niż dla pieca nr 3. Wpływ na to ma także lepsza jakość regulacji położenia elektrod, uzyskana w wyniku modernizacji układów regulacji pieca nr 3.

#### 4. UWAGI KOŃCOWE

Analizowano dane eksploatacyjne w postaci uśrednionej. Dane dla poszczególnych wytopów nie są powtarzalne i można jedynie posługiwać się analizą trendu tych danych.

Na podstawie obserwacji procesu wytopu stwierdzono, że istotne znaczenie dla stabilizacji mocy pieca łukowego ma stały i stabilny poziom żużla. Powoduje on bardziej symetryczną pracę toru elektrycznego bez potrzeby korekty prądowej asymetrii reaktancji toru.

Zastosowane na piecu nr 1 ramiona przewodzące nie wnoszą jednoznacznie pozytywnego wpływu na pracę tego pieca. Z jednej strony zwiększają moc maksymalną obwodu oraz zmniejszają obciążenie silników napędów elektrod, a tym samym poprawiają dynamikę tych napędów, ale jednocześnie zmniejszają reaktancje fazowe obwodu i piec pracuje przy większym współczynniku mocy obwodu z mniej stabilnymi łukami elektrycznymi. W efekcie uzyskiwana jest mniejsza moc obwodu pieca, zwłaszcza w początkowym etapie wytopu.



Rys.6. Relacja między czasem pracy toru elektrycznego a energią zużyta w trakcie wytopu dla pieca nr 3

Należy podkreślić, że w wyniku zmian technologii sterowanie roztopianiem w piecu łukowym istotnie się uprościło. Jednakże w dalszym ciągu dobór sterowania (programu mocy) pieca łukowego jest określany w sposób ewolucyjny, co wiąże się z długim czasem ustalania programu optymalnego. Jest to tym trudniejsze, że zużycie ścian pieca można dokładnie ocenić dopiero, gdy występuje konieczność remontu. W obecnej postaci sterowanie procesem wytopu ma charakter otwarty. Dla uwzględnienia zakłóceń powinno się mierzyć dodatkowe wielkości ułatwiające sterowanie piecem i pozwalające proces optymalizacji sterowania przyspieszyć.

Czy pomocne w tym celu mogą być inwestycje realizowane przez zagranicznych kontrahentów? Odpowiedź na to pytanie nie jest prosta i zależy od rodzaju inwestycji oraz sposobu ich realizacji, zwłaszcza jeśli dotyczy to sterowania. W przypadku Huty Zawiercie podobnie jak w przypadku jednej z najlepszych stalowni na świecie — Bayerische Stahlwerke można stwierdzić, że znaczna część jej sukcesów jest zasługą załogi, aktywnie uczestniczącej w modernizacji technologii produkcji. Uwzględniając doświadczenie tych ludzi nie powinno się rezygnować z ich aktywności, kupując wspaniałe, programowe panaceum na wszystkie kłopoty. Zwłaszcza, że taki „lek” może nie uwzględniać specyfiki warunków technologii i sterowania Huty Zawiercie, a ponadto — może uzależniać.

Autorzy niniejszym składają podziękowanie Panu mgr inż. Józefowi Gzielo za zgodę na wykorzystanie danych eksploatacyjnych.

## LITERATURA

1. Iganaki E., Izumi K., Ichikawa M.: *Integrated oxygen-enrichment control to attain maximum overall economy in steelmaking arc furnaces*. UIE 11, Malaga 1988.
2. *The electric arc furnace* — 1990. IISI Committee on Technology. Brussel 1990.



### **Dr hab. Miroslaw Wcislik,**

profesor nadzwyczajny Politechniki Świętokrzyskiej, urodził się 15 maja 1947 roku w Klimontowie koło Sandomierza. W 1971 roku ukończył studia, ze specjalnością automatyka, na Wydziale Elektroniki Politechniki Warszawskiej. Od 1972 roku pracuje nieprzerwanie na Wydziale Elektrotechniki Politechniki Świętokrzyskiej, wcześniej Kielecko-Radomskiej Wyższej Szkoły Inżynierskiej. W 1981 uzyskał stopień doktora nauk technicznych, a w 1994 tytuł doktora habilitowanego na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej, w zakresie elektrotechniki-elektrotermii, automatyki. Jego zainteresowania badawcze obejmują: modelowanie, sterowanie i konstrukcję układów: pomiarowych, wspomagania sterowania oraz sterowania komputerowego. Jest autorem i współautorem kilkunastu opracowań i wdrożeń prac naukowo-badawczych w przemyśle.



### **Mgr inż. Tadeusz Wtorek,**

lat 38, ur. 17.02.1959 r. w Morągu k Olsztyna. Absolwent Wydziału Elektroniki Politechniki Gdańskiej, o specjalności: aparatura elektroniczna i specjalizacji: metrologia elektroniczna. Żonaty, trójka dzieci, mieszka w Zawierciu. Od 1986 r. pracuje w Hucie Zawiercie w Zawierciu, od 1987 r. mistrz elektrotermii na wydziale elektrostalowni, a od 1991 mistrz oddziału komputera tamże. Zajmuje się m.in. pracą oraz optymalizacją programów topienia pieców łukowych. Zainteresowania zawodowe to metrologia, radio- komunikacja, technika cyfrowa i komputery.