

Lotar TOMCZYK  
Eugeniusz MATULA

IMŻ - Gliwice

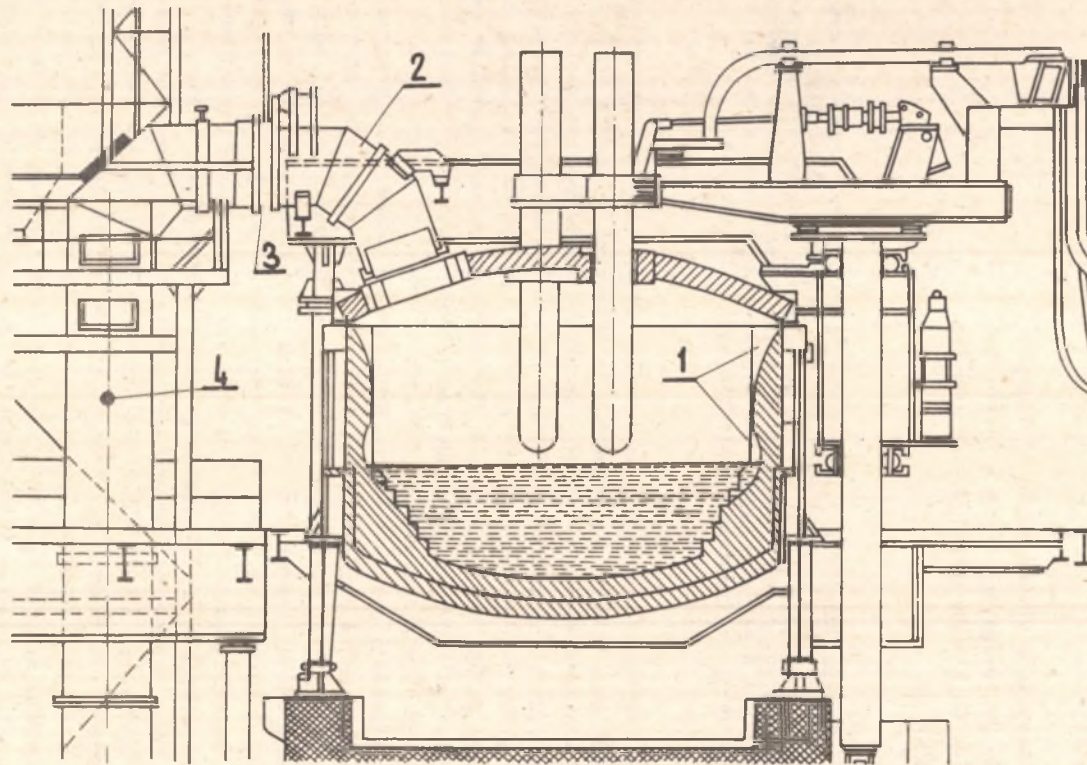
ANALIZA CZYNNIKÓW WPŁYWAJĄCYCH NA TRWAŁOŚĆ  
WYŁOŻENIA OGNIOTRWAŁEGO ŚCIAN I SKLEPIENIA  
STALOWNICZYCH PIECÓW ŁUKOWYCH O POJEMNOŚCI  
PONAD 100 t

Streszczenie. W pracy przeprowadzono analizę pracy stalowniczego pieca łukowego o pojemności 140 t. Czasokres eksploatacji pieców łukowych związany jest przede wszystkim z trwałością wyłożenia ogniotrwałego ścian i sklepienia. Przeprowadzone badania rozkładu temperatury w piecu pozwoliły na sformułowanie wniosków dotyczących podwyższenia trwałości wyłożenia ogniotrwałego pieca.

Niska trwałość wyłożenia ogniotrwałego ścian i sklepienia stalowniczych pieców łukowych o dużej pojemności była przyczyną wykonania szczegółowych pomiarów różnymi metodami i badań nad obciążeniem cieplnym wnętrza pieca. W wyniku tych badań zostały określone przyczyny nadmiernych obciążeń cieplnych, które występowały w dwóch strefach, dolnej na poziomie ciekłego żużla oraz górnej pod sklepieniem. Analiza tych wyników pozwoliła na ustalenie wniosków i programu prowadzenia wytopów w celu ograniczenia nadmiernych obciążeń cieplnych i zwiększenia trwałości wyłożenia.

W eksploatacji pieców łukowych o pojemności ponad 100 t trudnym i nieopanowanym jeszcze problemem jest niska trwałość wyłożenia ogniotrwałego ścian i sklepienia. W praktyce zdarzały się miejscowe przegrzania ścian bocznych w górnej części pieca w okresie roztopiania, zwykle po załadowaniu 2 lub 3 kosza i to nawet na początku kampanii, tj. po wymianie wyłożenia. Nagrzanie ścian bywało niekiedy tak znaczne, że obserwowano miejscowe zaczerwienienie się stalowego zewnętrznego płaszcza pieca.

Wysokie i nierównomierne obciążenie cieplne ścian pieca, a także sklepienia odbija się bardzo niekorzystnie na ich trwałości i wymaga kosztownych remontów, a ponadto prowadzi do przerw, a tym samym do obniżenia wydajności. Ogólnie uznawany, wprowadzony przez Schwabe'a wzór na obliczenie wskaźnika zużycia wymurówki pomija zupełnie sprawę sklepienia, zakłada przy tym, że zużycie ścian zależy od promieniowania łuków. Pogląd ten, zbytnio uproszczony, nie zawsze potwierdza się w praktyce, szczególnie w odniesieniu do pieców o dużej pojemności. W piecach tych warunki pracy są



Rys. 1. Przekrój wanny pieca łukowego o pojemności 140 t

1 - miejsca największego zużycia ścian, 2 - odciąg gazów, 3 - dopływ zassanego powietrza, 4 - punkt pomiaru temperatury gazów odciąganych z pieca



odmienne niż w piecach o małej pojemności, ponieważ z reguły załadowanie wsadu do pieca odbywa się co najmniej w dwóch porcjach, a niekiedy i trzech, zależnie od rodzaju złomu. Warunki te wpływają na rozkład obciążeń cieplnych wewnątrz pieca.

Ponadto często wprowadza się wraz ze złomem w drugim koszu wapno i dodatki żuźlotwórcze, co prowadzi do egzotermicznych procesów w czasie roztopiania. One również zwiększają obciążenie cieplne wnętrza pieca. Obserwacje zużycia wyłożenia ogniotrwałego ścian bocznych pieca wskazują na duże zużycie ścian na poziomie ciekłego żużla oraz w pobliżu sklepienia. Pomiędzy tymi poziomami zużycie jest znacznie mniejsze (przekrój zużytych ścian przedstawia rys. 1).

W omawianych piecach o dużej pojemności powinno się wyróżnić dwie strefy, w których obciążenia cieplne i zużycie ścian są największe; strefę dolną powyżej poziomu kąpielii, podlegającą intensywnemu działaniu promieniowania i bombardowania przez odpryski gorącego metalu i żużla oraz strefę górną wraz ze sklepieniem, w której niezależnie od promieniowania ściany i sklepienia są dodatkowo nagrzewane przez przepływ zapylnych gorących gazów.

Celem szczegółowego zbadania obciążenia cieplnego wnętrza pieca zostały przeprowadzone, na piecu łukowym o pojemności wsadowej 140 t i mocy 60/72 MVA, z zastosowaniem różnych metod następujące pomiary:

- rozkładu temperatury wymurówki pieca za pomocą termoelementów Ni-NiCr, wbudowanych w ściany pieca naprzeciw elektrod,
- natężenia promieniowania na jednostkę powierzchni na poziomie kąpielii za pomocą specjalnie wykonanej sondy bimetalicznej jednostronnie chłodzonej wodą,
- temperatury gorących gazów odciąganych z pieca w zależności od chwilowego obciążenia pieca,
- rozkładu temperatur na powierzchni płaszcza stalowego pieca za pomocą kamery termowizyjnej AGA,
- przebiegu mocy czynnej, biernej i prądów fazowych podczas pełnego cyklu wytapienia.

Wymienione pomiary nie zawsze mogły być, ze względów praktycznych przeprowadzone jednocześnie w jednym wytopie, ale wykonywane były przez dłuższy okres (kilku miesięcy) przy różnym stanie zużycia ścian i sklepienia i różnych programach prowadzenia wytopów.

Temperaturę ścian pieca rejestrowano w trzech miejscach za pomocą termoelementów zagłębionych na ok. 8,0 cm w wyłożeniu ścian naprzeciw elektrod na poziomie największego zużywania się ścian. Po nowym wyłożeniu ścian wykresy wskazywały powolny stały wzrost temperatury od początku roztopiania i kosza do końca wytopu. Maksymalne temperatury zostały osiągnięte po ok. 3 godzinach, najwyższa przy elektrodzie nr 2 - 580°C i niższe przy elektrodach nr 1 - 540°C i nr 3 - 370°C. Różnice temperatur wska-

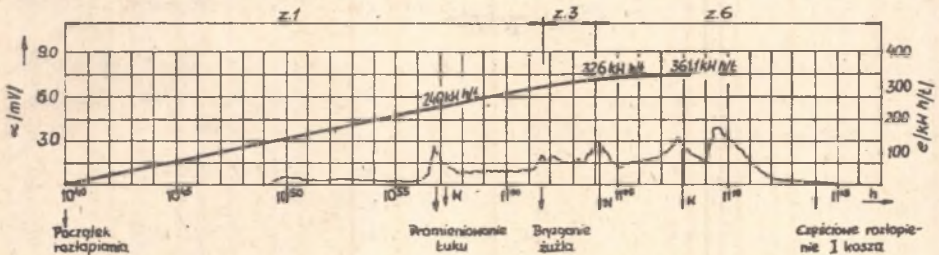
zywały na asymetrię obciążenia cieplnego ścian. Na skutek zużycia ścian przy kolejnym 53 wytopie poziom temperatur był wyższy i maksymalna temperatura przy elektrodzie nr 1 wynosiła  $850^{\circ}\text{C}$ . Duża masa wyłożenia ogniotrwałego ścian, wskutek bezwładności cieplnej, z opóźnieniem reaguje na wszelkie zmiany ciepłe zachodzące wewnątrz pieca.

Lepszy wgląd w przebieg tych procesów dają pomiary za pomocą sondy reagującej głównie na promieniowanie ciepłe. Czujnikiem sondy była płytka bimetaliczna jednostronnie i stabilnie chłodzona wodą. Sonda zezwalała na pomiar chwilowej wartości natężenia strumienia cieplnego z zależności:

$$Q = \alpha \cdot K(\text{J}/\text{cm}^2),$$

gdzie:

- $\alpha$  - wychylenie miliwoltomierza mierzącego SEM płytki bimetalicznej,  
K - stała przyrządu.



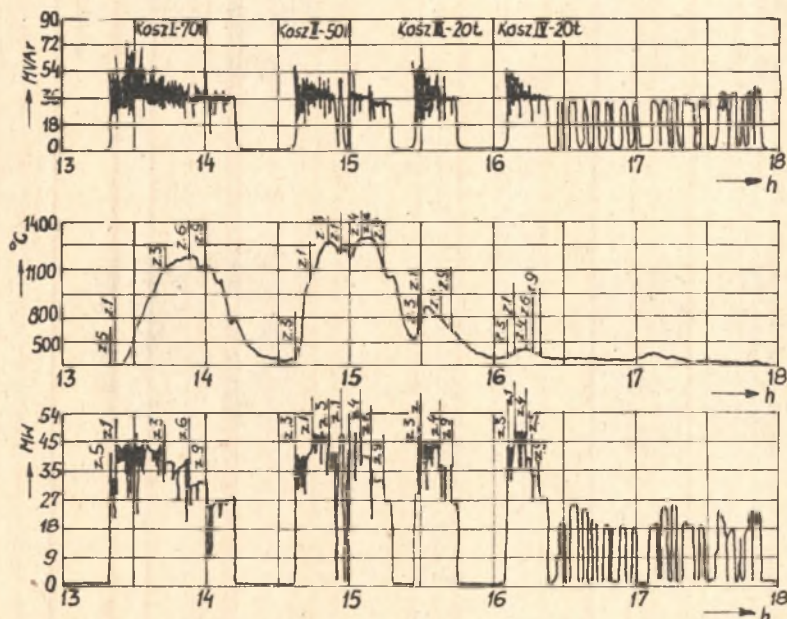
Rys. 2. Przebieg wskazań czujnika sondy bimetalicznej "X" funkcji czasu  $t$  zależnych od strumienia cieplnego wewnątrz pieca  
c - zużycie energii, w - chwilowe wyłączenie

Rys. 2 przedstawia przebieg wskazań miliwoltomierza  $\alpha = f(t)$  podczas roztopienia po załadowaniu 1 kosza. Sonda umocowana była na statywie i wstawiona z boku okna wsadowego ponad poziomem kąpiel. Wykres wskazuje na wyraźny wzrost obciążenia cieplnego wychylenie czujnika do ok. 3 mV po zużyciu ok. 240 kWh/t, przy pracy na zaczepie 1. Wzrost ten utrzymywał się nadal po obniżeniu napięcia i przełączeniu na zaczep 6. Chwilowe wysoki obciążenia występowały, gdy oprócz promieniowania energia cieplna była przekazywana przez gorące gazy omywające płytkę sondy oraz przez odpryski ciekłego żużla i metalu. Dalsze prowadzenie pomiarów za pomocą sondy po załadowaniu drugiego kosza było niemożliwe, ponieważ sonda ulegała uszkodzeniom wskutek bombardowania odpryskami i zalewania ściekającym ze ścian żużlem. W końcowym okresie roztopienia wsadu 1 kosza natężenie strumienia cieplnego dalej wzrastało, a wychylenie miliwoltomierza osiągnęło wartość  $\sim 8$  mV.



Pomiary wykonane za pomocą sondy wskazują, że oprócz promieniowania łuków, kąpeli i elektrod duży wpływ na chwilowe obciążenie cieplne ścian mają gorące gazy i odpryski ciekłego żużla i metalu. Największe obciążenie cieplne ponad poziomem kąpeli występują naprzeciw elektrod, gdzie promieniowanie łuku oraz oddziaływania gorących gazów i odprysków jest największe.

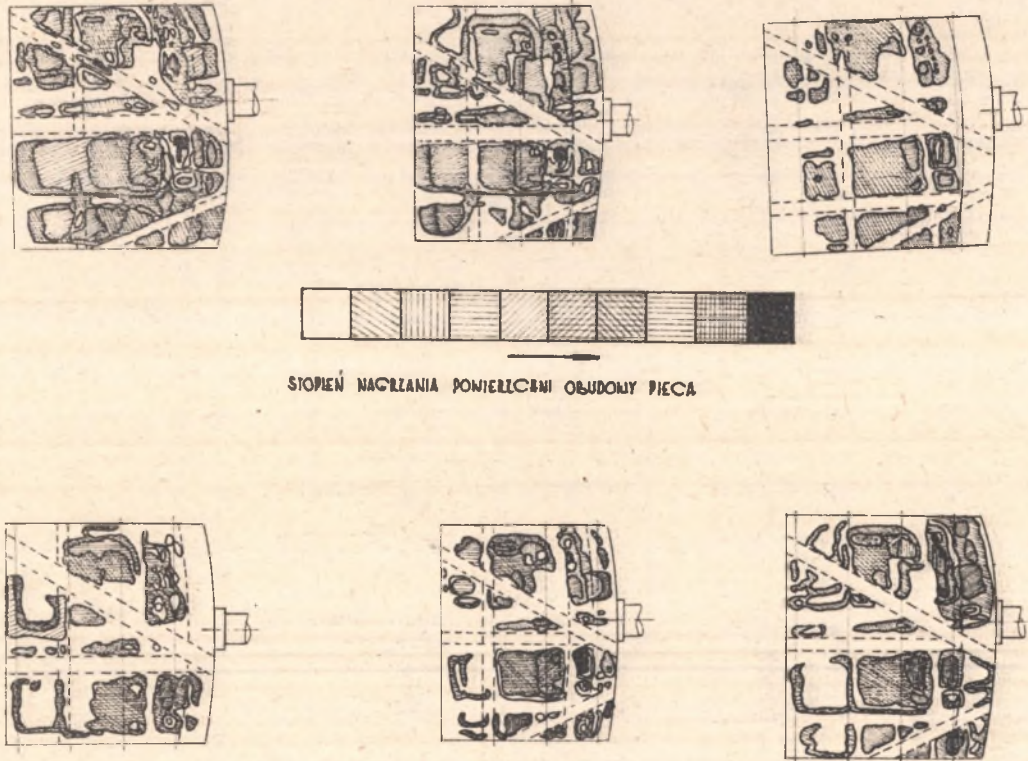
W celu zorientowania się, jaką temperaturę osiągają gorące gazy odciągane z pieca oraz jak zmienia się ich temperatura i od czego zależy, przeprowadzono pomiary za pomocą specjalnie przygotowanego termometru z termoelementem bimetalowym Pt-PtRh.



Rys. 3. Zmiany temperatury gazów odciąganych z pieca podczas roztopienia wsadu (wykres środkowy) w zależności od pobranej mocy czynnej (wykres dolny) i biernej (wykres górny)

Temperaturę gazów odciąganych z pieca mierzono za króćcem odciągowym (rys. 1) po zassaniu powietrza zewnętrznego celem dopalenia znajdujących się ewentualnie gazów  $\text{CO}$  i  $\text{H}_2$ . Ponieważ zassanie zachodziło z bardzo dużym nadmiarem powietrza w rezultacie następowało obniżenie temperatury gazów w porównaniu z ich temperaturą przed króćcem odciągowym. Temperaturę gazów mierzono tak w środku przewodu odciągowego, jak i przy jego wewnętrznej powierzchni, gdzie temperatury były nieco niższe.

Wykres na rys. 3 przedstawia przebieg temperatury gazów odciąganych z pieca mierzonych w pobliżu powierzchni wewnętrznej w czasie pełnego wyto-



Rys. 4. Rozkład temperatury na powierzchni zewnętrznej ściany pieca (naprzeciw elektrody 3)  
 a) po roztopianiu wsadu i b) przed spustem metalu



pu w zależności od wartości pobranej mocy czynnej i biernej. Znaczny wzrost temperatury gazów nawet ponad  $1300^{\circ}\text{C}$  zachodził przy wzroście średniej mocy czynnej ponad 40 MW.

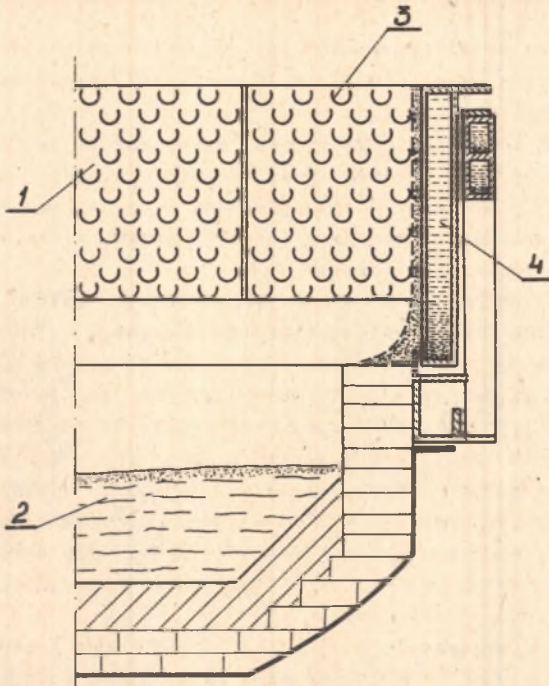
Wahania pobranej mocy czynnej przy niespokojnym paleniu się łuku podwyższają wartość mocy średniej oraz temperaturę gazów. Badania te przekonują o potrzebie obniżania mocy, gdy piec pracuje przy odsłoniętych łukach oraz o kontroli temperatury gorących gazów, które w poważnym stopniu mogą obniżyć trwałość sklepienia.

Trwałość wyłożenia ścian pieców stalowniczych zależy w głównej mierze od stopnia nierównomierności obciążenia cieplnego ścian wewnętrznych, przypadającego na jednostkę powierzchni. Pewnym odzwierciedleniem tej nierówności daje obraz powierzchni wanny uzyskany za pomocą kamery termowizyjnej, który przedstawia mozaikę powierzchni izotermicznych występujących na ścianach zewnętrznego płaszczka pieca (rys. 4). Zwraca uwagę fakt, że ograniczone powierzchnie, wykazujące najwyższe temperatury, pojawiają się już w okresie roztopiania i to w górnej strefie w pobliżu sklepienia. Chłodzenie wodne ścian bocznych pieców o dużej mocy wprowadzone w Japonii zmniejsza w poważnym stopniu nierównomierność obciążenia cieplnego ścian i przedłuża trwałość wyłożenia.

Specjalne rozwiązanie górnej części ścian pieca z zastosowaniem skrzynkowych chłodziń wodnych, opatentowane przez firmę Korf-Stahl A.G. Baden-Baden według rys. 5, zezwala dodatkowo na zwiększenie o 10 do 20% pojemności wewnętrznej pieca, co jest bardzo pożądane w piecach o dużej pojemności wsadowej wymagających ładowania wsadu w kilku porcjach. Ściany wewnętrzne płaszczka stalowego ponad poziomem utrzymującego się żuźla nie są wyłożone cegłami ogniotrwałymi, lecz jedynie cienką warstwą narzuconego materiału ogniotrwałego. W celu ścisłego przylegania warstwy ogniotrwałej i dobrego odprowadzenia ciepła z górnej części pieca ściany wewnętrzne stalowego płaszczka posiadają przyspawane krótkie półrurki. Skrzynki chłodzone wodą przylegające do płaszczka zapewniają dobre odprowadzenie ciepła. Opisane rozwiązanie chłodzenia ścian może być zastosowane do istniejących pieców stalowniczych z dzieloną wanną piecową.

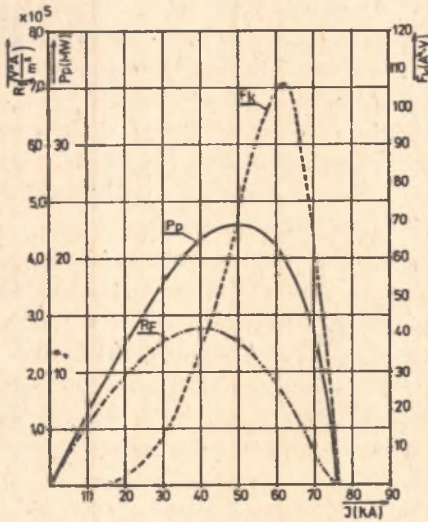
Podczas prowadzonych badań nad trwałością wyłożenia ogniotrwałego zwrócono uwagę na zjawisko stale przemieszczającej się kolumny łukowej wskutek wzajemnego elektrodynamicznego oddziaływania prądów i pól magnetycznych łuków. Ruch wahadłowy kolumny łukowej zmniejsza stabilność palenia się łuków, zwiększa temperaturę i straty cieplne w gazach odciąganych z pieca, a zmienny kierunek ciśnienia, który wywiera kolumna łukowa na ciekły żużel, powoduje krążenia żuźla i wymywania ścian wanny pieca na poziomie kąpieli rys. 1.

Szczegółowa analiza matematyczna zachodzących zjawisk pozwoliła na sformułowanie zależności wartości składowej poziomej siły powodującej krążenia żuźla, która jest proporcjonalna do prądu w 4 potęgę. Na wykresie rys. 6 na tle charakterystyk elektrycznych pieca  $P_2 = f(I)$  przedstawiono



Rys. 5. Przekrój pieca łukowego z dzieloną wanną i skrynkowym chłodzeniem wodnym górnej części pieca według firmy Korf-Stahl A.G.

1 - górna część, 2 - dolna część wanny, 3 - segmenty wyłożone warstwą ogniotrwałą, 4 - skrynkowe chłodnice wodne



Rys. 6. Wykres zmian wartości wskaźnika zużycia wymurówki -  $R_f$  i składowej siły poziomej wydłużającej krążenie żużla -  $F_k$  w zależności od prądu na tle charakterystyki elektrycznej pieca  $P_2 = f I$  na zaczeple 12



przebieg zmian wartości względnej wskaźnika zużycia wymurówki -  $R_f =$

$= C_1 \frac{U_z^2 \cdot J}{a^2}$  oraz składowej siły poziomej, wywołującej krążenie żużla -

$F_k = C_2 \frac{P \cdot J^2}{D_p}$  w zależności od wartości prądu łuku - gdzie  $U_z$  - napię-

cie łuku,  $J$  - prąd łuku,  $a$  - odległość elektrody od ściany pieca,  $P$  - moc łuku,  $D_p$  - średnica koła podziałowego elektrod,  $C_1, C_2$  stałe. Z wykresu widać, że maksimum wartości składowej siły poziomej wywołującej krążenie żużla zachodzi przy większych wartościach prądu niż maksimum wartości wskaźnika zużycia wymurówki.

Dobór parametrów elektrycznych podczas pracy pieca w okresie roztopiania i rafinacji wymaga kompromisu pomiędzy różnymi czynnikami, które oddziałują na trwałość wyłożenia ścian i sklepienia.

Wpływ trwałości ścian pieców stalowniczych na wskaźniki eksploatacyjne zależy od zastosowanej technologii wytapiania stali (proces jedno- lub dwuzłożowy, ewentualnie obróbka poza piecowa) oraz od konstrukcji wanny piecowej.

W przypadku pieców z wymienną, dzieloną wanną piecową trwałość wymurówki w mniejszym stopniu wpływa na wskaźniki eksploatacyjne. Dla oceny trwałości wymurówki należy oprócz liczby wytopów, podawać rodzaje zastosowanej technologii wytapiania.

#### WNIOSKI

Warunki wpływające na trwałość wyłożenia ogniotrwałego ścian w stalowniczych piecach łukowych są różne w piecach o małej i dużej pojemności wsadowej. Utrzymanie trwałości wyłożenia ogniotrwałego pieców o dużej pojemności wsadowej na średnim poziomie ok. 100 wytopów w procesie z rafinacją wymaga zachowania podczas prowadzenia pracy następujących warunków:

- Przestrzegania najkorzystniejszego momentu wprowadzenia kolejnych porcji wsadu w drugim i ewentualnie trzecim koszu. Warunkiem powinno być roztopienie wsadu pierwszej i ewentualnie drugiej porcji tylko do tego stopnia, aby zmieściła się porcja następna.
- Obniżenie mocy pobranej i napięcia po odsłonięciu się łuków w trakcie roztopiania poszczególnych porcji wsadu, szczególnie po stwierdzeniu szybkiego narastania temperatury gazów w przewodzie odciągowym.
- doboru właściwych zaczeptów napięciowych oraz nastaw prądów fazowych podczas wyrabiania stali. Dobrane parametry powinny ograniczyć promieniowanie poważnej części mocy łuków na ściany wanny piecowej a jednocześnie nie dopuszczać do jej wymywania przez krążący żużel.
- Zapewnienia podczas pracy pieców regulacji odciągu gazów, tak aby nie dopuścić do nadmiernego podciśnienia wewnątrz pieca i chłodzenia ścian

i kąpeli, a z drugiej strony zbyt wysokich temperatur gazu. Najwyższe temperatury gazów występują podczas roztopiania wsadu oraz w czasie świeżenia kąpeli rudą.

Wprowadzenie chłodzenia wodnego ścian bocznych pieców o dużej pojemności umożliwia prawie dwukrotne zwiększenie ich trwałości, zmniejszenie zużycia materiałów ogniotrwałych i liczby postojów remontowych a ponadto poprawia warunki pracy wokół pieca. Zwiększona intensywność chłodzenia wodnego ścian pieca może w niewielkim stopniu zwiększyć zużycie energii elektrycznej o 10 do 20 kW.h na tonę stali.

#### АНАЛИЗ ФАКТОРОВ ВЛИЯЮЩИХ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ОБЛИЦОВКИ ОГНЕУПОРАМИ СТЕН И СВОДА ДУГОВЫХ ПЕЧЕЙ ЁМКОСТЬЮ СВЫШЕ 100 т

##### Р е з ю м е

В статье производится анализ работы сталелитейной дуговой печи ёмкостью 140 т. Срок эксплуатации дуговой печи зависит прежде всего от устойчивости огнеупорной облицовки стен и свода. Проведены исследования распределения температуры в печи дали возможность сформулировать выводы, касающиеся увеличения устойчивости огнеупорной облицовки печи.

#### THE ANALYSIS OF FACTORS INFLUENCING THE DURABILITY OF REFRACTORY LINING OF ROOFS AND WALLS OF METALLURGIC ARC FURNACES, CAPACITIES OVER 100 T

##### S u m m a r y

The analysis of metallurgic arc furnace (capacity 140 t) operation has been performed in the paper. The exploitation life of arc furnaces is mainly connected with the durability of walls and roof refractory lining. The performed research of temperature distribution in the furnace allowed for formulation of conclusions pertinent to prolonging the furnace refractory lining life.