

# INNOWACYJNA METODA IDENTYFIKACJI USZKODZEŃ I PLANOWANIA REMONTU WYŁOŻENIA OGNIOTRWAŁEGO W PIECU OBROTOWYM

Jerzy DUDA, Grzegorz SIEMIĄTKOWSKI

**Streszczenie:** Jednym z ważniejszych składników kosztów produkcji cementu są koszty związane z wyłożeniem wnętrza pieca materiałami ogniotrwałymi. Materiały ogniotrwałe mają duży wpływ na wskaźniki techniczno-ekonomiczne pieca obrotowego. W pracy przedstawiono nowy sposób identyfikacji stanu wymurówki w piecu, w oparciu o pomiar temperatury płaszcza pieca. Opracowany system ekspertowo-neuronowy, wykorzystuje rejestrowane dane pomiarowe z systemów monitorowania linii wypalania klinkieru i dokonuje bieżącej oceny stanu wymurówki. Oprócz określenia grubości wymurówki i tendencji zmian, system pozwala z 5 dniowym wyprzedzeniem określić możliwość wystąpienia sytuacji awaryjnych w piecu obrotowym. Zastosowanie w przemyśle cementowym opracowanego systemu ekspertowo-neuronowego pozwoli na wcześniejsze przygotowanie się do awarii wymurówki oraz ograniczenie czasów postojów pieców związanych z pracami remontowymi wymurówki, a tym samym na zmniejszenie strat w produkcji klinkieru.

**Słowa kluczowe:** piec obrotowy, materiały ogniotrwałe, logistyka, pomiary, sieci neuronowe.

## 1. Wprowadzenie

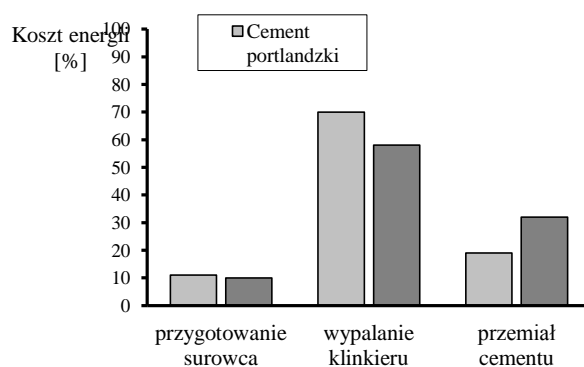
Rozwój nowych innowacyjnych technik wytwarzania, jaki obserwuje się w ostatnim okresie, nie wynika tylko z dążenia do intensyfikacji produkcji i obniżenia kosztów, ale również z konieczności ograniczenia szkodliwego oddziaływania przemysłu na środowisko. Ze względu na masową produkcję oraz wysokie zużycie paliw i energii, przemysł cementowy, należy do przemysłów szczególnie energochłonnych i uciążliwych dla środowiska. W związku z tym problem obniżenia energochłonności produkcji cementu jest ciągle aktualny.

W zależności od własności surowca, technologii wytwarzania oraz nowoczesności zastosowanych maszyn i urządzeń, koszt energii w całkowitych kosztach produkcji cementu wynosi od 20-50%. Na rys.1 przedstawiono przykładowo udział kosztów energii w rozbiciu na poszczególne etapy produkcji, dla dwóch gatunków cementu.

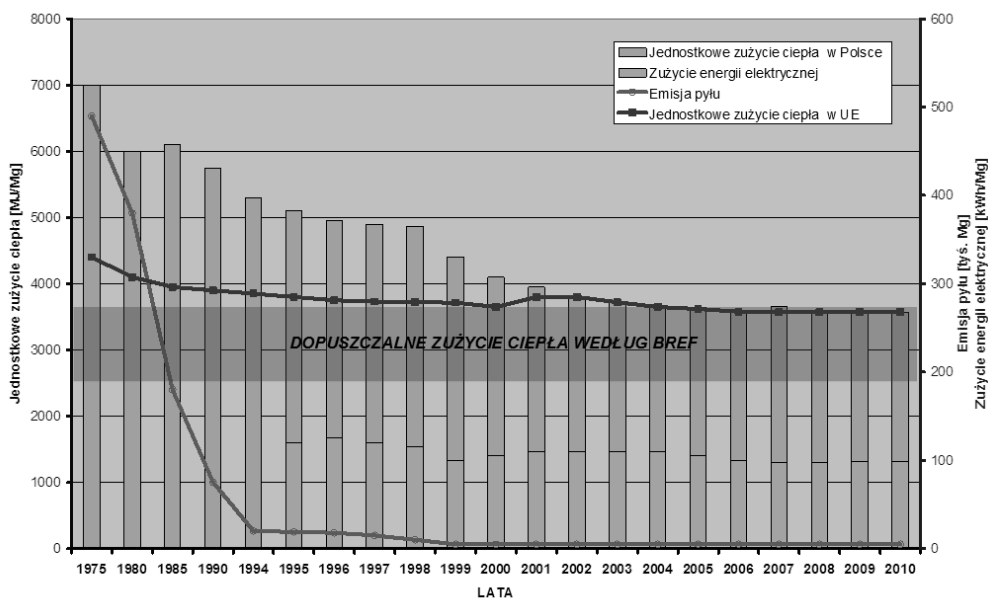
Ponad 50% kosztów energii, niezależnie od produkowanego rodzaju cementu, związanych jest z procesem wypalania klinkieru. Procesowi wypalania, który decyduje o wielkości produkcji cementu, podporządkowana jest praca pozostałych węzłów technologicznych cementowni. W związku z tym, do niego odnoszą się najczęściej zamierzenia dotyczące racjonalizacji gospodarki energetycznej i ochrony środowiska [1].

Dążenie do obniżenia energochłonności – kosztów produkcji, nie wynika tylko z postępującego wzrostu cen nośników energii, ale również z konieczności poprawy warunków pracy oraz ograniczenia szkodliwego oddziaływania przemysłu na środowisko i

dostosowania go do standardów emisji krajów Unii Europejskiej. Zgodnie z Dyrektywą IPPC (Integrated Pollution Prevention Control- zintegrowane zapobieganie i kontrola zanieczyszczeń), wartości graniczne emisji powinny być ustalane na podstawie BAT (Best Available Techniques – najlepsze dostępne techniki). W roku 1990 sfinalizowano w Unii Europejskiej pierwsze przepisy BAT dla przemysłu cementowego, które zawierają wykaz zalecanych najlepszych dostępnych technik. Dokument ten jest stale wraz z rozwojem nowych technologii uaktualniany. Obowiązująca aktualnie wersja tzw. BREF (BAT Reference Document - najlepsze dostępne techniki nie powodujące nadmiernego wzrostu kosztów, przeciwdziałających lub zmniejszających zanieczyszczenie powietrza) opracowana przez European IPPC Bureau, pochodzi z maja 2010 roku.



Rys. 1. Udział kosztów energii na poszczególne etapy produkcji



Rys. 2. Wpływ modernizacji przemysłu cementowego na zużycie ciepła i emisję pyłową

Przeprowadzona w ostatnich latach modernizacja przemysłu cementowego w Polsce, polegająca m.in. na:

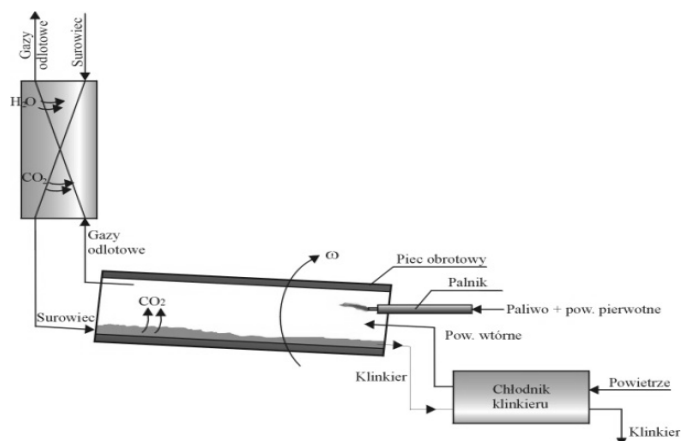
- zastosowaniu nowych innowacyjnych technik wypalania i przemiału,
- likwidacji energochłonnej metody mokrej,
- automatyzacji procesu,

spowodowała, że przemysł ten należy dzisiaj do najnowocześniejszych w Europie. Praktycznie wszystkie cementownie w kraju wypełniają już wymagania BAT, zdefiniowane w tzw. BREF. Wpływ nowych innowacyjnych technologii na energochłonność i emisję pyłową przemysłu cementowego w kraju przedstawiono na rys.2. Aktualnym problemem, który stoi przed przemysłem, jest poprawienie sprawności procesu wypalania wykorzystując energię odpadową poza piecem oraz ograniczenie kosztów eksploatacyjnych (remonty i konserwacja).

## 2. Wpływ technologii wypalania na energochłonność i wskaźniki techniczno-ekonomiczne

Wzrost zapotrzebowania na cement oraz konieczność ograniczenia zużycia paliw i emisji szkodliwych gazów, spowodowały intensywny rozwój nowych technik wypalania. W ostatnim dwudziestolecu w technologii wypalania klinkieru dokonał się znaczący postęp, który oprócz zwiększenia sprawności cieplnej i wzrostu produkcji przyczynił się do obniżenia szkodliwego wpływu na środowisko.

Proces wypalania klinkieru odbywa się w piecu obrotowym, który stanowi długi, stalowy waleczek wyłożony wewnątrz wymurówką ogniotrwałą, obracający się wokół swojej osi z prędkością obrotową od 0,7 do 4,5 obr/min. Oś pieca jest nachylona w stosunku do poziomu od 2 do 4%. Schemat pieca obrotowego do wypalania klinkieru cementowego metodą suchą przedstawiono na rys.3. Piec obrotowy jest typowym przeciwprądowym wymiennikiem ciepła, w którym na skutek ruchu obrotowego wypalany surowiec przemieszcza się w przeciwnym kierunku do ogrzewających go spalin powstałych ze spalania paliwa. Zasilanie pieca materiałem - nadawą surowcową następuje w jego górnym, tzw. „zimnym” końcu, natomiast proces spalania przebiega w jego dolnym – „gorącym” końcu.



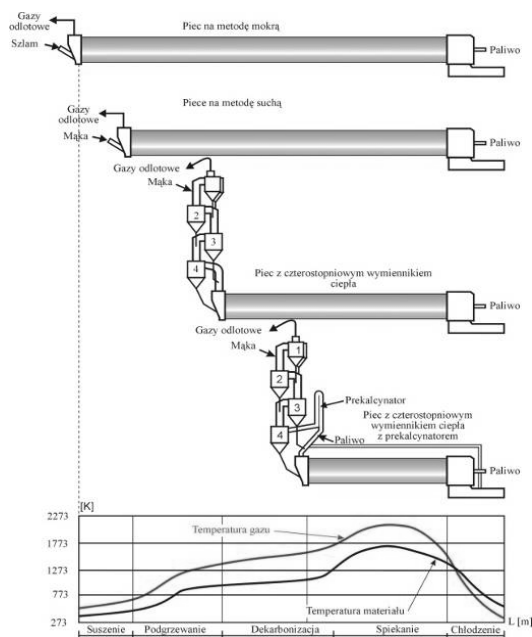
Rys. 3. Schemat pieca obrotowego

Ze względu na sposób przygotowania surowca i stosowaną technologię, proces wypalania klinkieru odbywa się najczęściej:

- w piecach na metodę mokrą,
- w długich piecach na metodę suchą,
- w piecach na metodę suchą z zewnętrznymi wymiennikami ciepła,
- w piecach na metodę suchą z układem wstępnej dekarbonizacji.

W nowoczesnych cementowniach, wyposażonych w składy uśredniające surowca (a często też węgla), wykorzystywane są komputerowe systemy sterowania zestawianiem mieszaniny surowcowej w oparciu o analizator rentgenowsko-fluorescencyjny, co pozwala na pełną stabilizację parametrów surowca. Dzięki temu sterowanie procesem wypalania sprowadza się do utrzymywania stanu ustalonego, polegającego na stabilizacji parametrów skupionych, jakimi są temperatury materiału i gazów w charakterystycznych punktach pieca.

Wpływ rozwoju technologii wypalania na konstrukcję pieca (rys.4) oraz na zużycie ciepła, energii elektrycznej i wydajność jednostkową przedstawiono w tabeli 1[1].



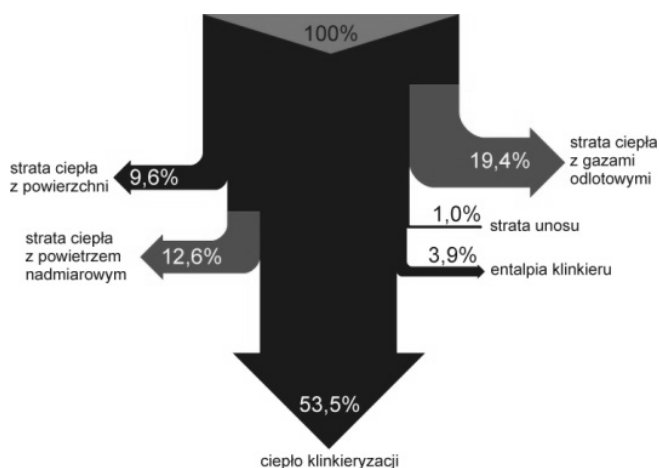
Rys. 4. Wpływ technologii wypalania na konstrukcję pieca i rozkład temperatur

Wzrost wydajności pieców i obniżenie jednostkowego zużycia paliwa nastąpiło po wprowadzeniu na szeroką skalę w miejsce metody mokrej, suchego sposobu wypalania klinkieru z podgrzewaniem surowca w stanie zawieszenia. Nowe techniki wytwarzania klinkieru metodą suchą polegają głównie na zwiększeniu w procesie wypalania roli zewnętrznych wymienników ciepła i ograniczeniu funkcji samego pieca obrotowego. Pozwoliło to na znaczne zintensyfikowanie wymiany ciepła, a tym samym zwiększenie sprawności cieplnej i wzrost wydajności.

Tab. 1. Energochłonność i wydajność jednostkowa pieca dla różnych metod wypalania

Technologia wypalania	Energia elektr. kWh/t	Zużycie ciepła kJ/kg kl	Wydajność Mg/m <sup>3</sup> d
metoda mokra	17,5	5500-6000	0,5 – 0,7
długi piec na metodę suchą	17,5	3800-4600	0,6 – 1,0
piec z wym.cyklon.4-ro st.	22,5	3200-3350	1,8 – 2,3
piec z wym.cyklon.4-ro st. z dekarbonizacją AT	22,8	3100-3300	2,0 – 3,0
piec z wym. cyklon. 6-cio st. z dekarbonizacją AS	23,5	2700-3000	4,5 - 5,5

Kolejną innowacyjną techniką wytwarzania klinkieru, istotną z punktu widzenia wzrostu wydajności pieca, było wdrożenie wstępnej dekarbonizacji surowca. Uzyskane w kraju, w wyniku przeprowadzonej restrukturyzacji przemysłu cementowego, efekty technologiczne i ekonomiczne odpowiadają wskaźnikom najlepszych technologii na świecie. Na rys.5 przedstawiono na wykresie Sankey'a, typowy bilans pieca obrotowego na metodę suchą.



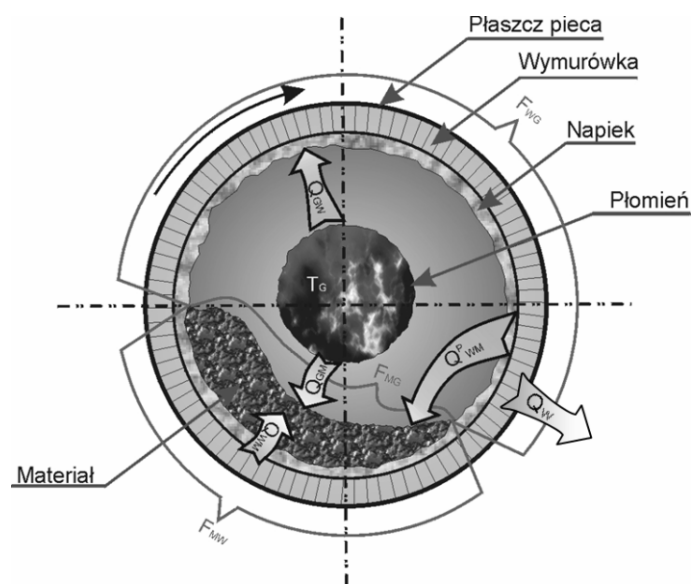
Rys. 5. Bilans pieca obrotowego

Z przedstawionych danych wynika, że nowoczesny piec obrotowy jest urządzeniem o stosunkowo niskiej, ok.50% sprawności. Straty związane z energią odpadową (entalpia gazów odlotowych i powietrza nadmiarowego z chłodnika klinkieru) stanowią ponad 30% ciepła dostarczonego do procesu. Istniejące jeszcze teoretyczne rezerwy zmniejszenia tych strat, wymagają poważnych nakładów i według dzisiejszego stanu techniki są nieopłacalne. W związku z tym, poszukuje się innych sposobów dalszego obniżenia energochłonności – kosztów produkcji. Jednym z takich pośrednich sposobów jest obniżenie kosztów eksploatacji i remontów pieca obrotowego.

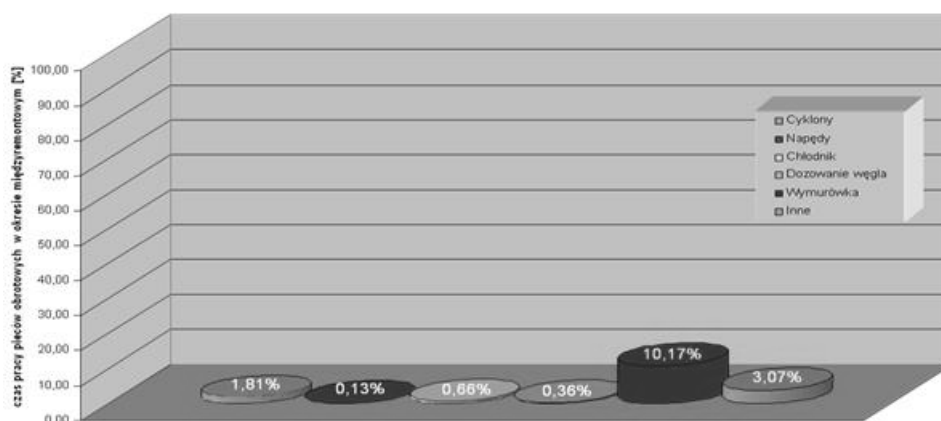
### 3. Wpływ wyłożenia ogniotrwałego na koszty produkcji cementu

Jednym z ważniejszych składników kosztów produkcji cementu są koszty materiałów

ogniotrwałych i prac związanych z remontami wyłożenia ogniotrwałego (tzw. wymurówki) pieca obrotowego. Materiały ogniotrwałe spełniają bardzo ważną rolę. Oprócz ochrony przed wysokimi temperaturami stalowych konstrukcji instalacji piecowej oraz ograniczenia strat ciepłych do otoczenia z powierzchni pieca, uczestniczą również w wymianie ciepła pomiędzy gazami a wypalonym surowcem. Na rys.6 przedstawiono na przekroju pieca obrotowego podstawowe strumienie ciepłe uczestniczące w procesie wypalania.



Rys. 6. Przekrój pieca - schemat przekazywania ciepła



Rys. 7. Czasy przymusowych postojów pieców spowodowanych nagłymi awariami w okresach międzyremontowych

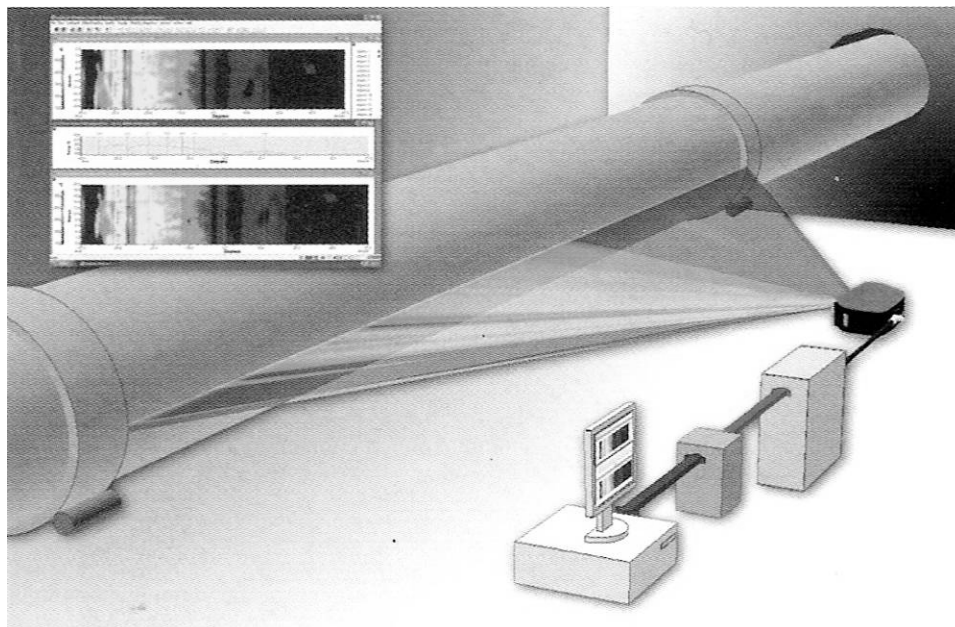
Z danych statystycznych dotyczących analizy czasu pracy pieców obrotowych pracujących w krajowym przemyśle cementowym i przyczyn nieplanowanych postojów (rys.7.) wynika, że awarie związane z materiałami ogniotrwałymi, stanowią średnio ok. 10

% całkowitego czasu pracy pieców w okresie międzyremontowym [2]. Natomiast pozostałe postoje, stanowią tylko ok.3% całkowitego czasu pracy pieca.

Ten długi czas postoju, związany z remontem wymurówki nie wynika tylko z czasu niezbędnego na wychłodzenie pieca, przeprowadzenie remontu i następnie uruchomienie (suszenie i wygrzewanie wymurówki), ale również z problemów logistycznych związanych z dostarczeniem materiałów ogniotrwałych w wymaganym czasie i ich składowaniem. Sposób pakowania, transportu i magazynowania materiałów ogniotrwałych, ma duży wpływ na ich jakość i własności eksploatacyjne. Materiał ogniotrwały charakteryzuje się dużą kruchością, dlatego wymaga specjalnych warunków transportu i składowania. Warunki te są określone polską normą PN-81/H-12002. Ze względu na wysokie koszty materiałów ogniotrwałych, dużą (w zależności od stref w piecu) różnorodność gatunków i rodzajów kształtek, oraz zagrożenia uszkodzeń w czasie magazynowania powodują, że cementownie unikają gromadzenia zapasów tych wyrobów. W związku z tym, ważnym zagadnieniem w cementowni jest zabezpieczenie na czas wynikający z harmonogramu planowanego remontu wymurówki, dostaw wymaganych (ilość i rodzaj) materiałów ogniotrwałych. Inaczej jest jeśli remonty wymurówki są nieplanowane – a takich w trakcie eksploatacji pieca nie brakuje. Wówczas zasadniczym czynnikiem wpływającym na przedłużenie czasu remontu jest czas potrzebny na określenie zapotrzebowania na materiały ogniotrwałe. Informację o ilości i rodzaju materiałów ogniotrwałych wymaganych w remoncie, można uzyskać dopiero po zatrzymaniu i wychłodzeniu pieca, w oparciu przegląd jego wnętrza i pomiary grubości wymurówki. Z jednej strony koszty magazynowania, a z drugiej straty produkcji wynikające z braku zabezpieczenia w terminie dostaw materiałów ogniotrwałych powodują, że ważnym problemem jest stworzenie warunków pracy w systemie Just In Time. Pozwoli to na zredukowanie czasu dostaw materiałów ogniotrwałych do wymaganego minimum. Skuteczność wdrożenia metody JIT, oprócz rozwiązań systemowych pomiędzy cementownią a dostawcami materiałów ogniotrwałych, wymaga szybkiej informacji o potrzebach wynikających z planowanego remontu pieca. W dotychczasowej eksploatacji pieców, realizacja systemu JIT jest ograniczona brakiem takiej informacji. Jedynym parametrem pozwalającym oszacować spodziewany remont jest pomiar temperatury powierzchni pieca. Obecnie w cementowniach wartość temperatury płaszcza pieca jest monitorowana przez kamery termowizyjne lub stacjonarne pirometry optyczne (rys.8).

Urządzenia te pozwalają na szybkie wykrycie sytuacji awaryjnych, czyli stref przegrzania pieca obrotowego. Nie dostarczają jednak żadnych konkretnych informacji na temat rzeczywistej grubości wymurówki i napięku ochronnego, w trakcie jego eksploatacji. Jest to informacja mocno ograniczona i sprowadza się właściwie do kontroli i zabezpieczenia stalowego walczaka pieca przed uszkodzeniami będącymi wynikiem awarii wymurówki. Pomiar ten nie pozwala również na wcześniejsze określenie zakresu zniszczeń materiałów ogniotrwałych. W związku z tym, ważnym zagadnieniem jest opracowanie metody pomiarowej, która pozwoli na określenie w czasie pracy pieca, przybliżonego stanu jego wnętrza i postępującego stopnia zniszczenia materiałów ogniotrwałych. Dzięki takiej metodzie będzie można wcześniej przygotować się do remontu bieżącego wymurówki, co w istotny sposób wpłynie na skrócenie do minimum czasu postoju pieca. Pozwoli bowiem na uruchomienie „łańcucha logistycznego”, który zabezpieczy dostarczenie i magazynowanie wymaganych materiałów ogniotrwałych, niezbędnych do przeprowadzenia nieuniknionego remontu bieżącego – jeszcze przed wystąpieniem sytuacji awaryjnej. W ten sposób wyeliminowany zostanie składnik okresu postoju związany z koniecznością oceny

wnętrza pieca, zamówienia i dostawy odpowiednich materiałów ogniotrwałych niezbędnych do przeprowadzenia remontu.



Rys. 8. Termowizyjny pomiar temperatury płaszcza pieca [3]

Skutkiem takiego działania będzie znaczne ograniczenie czasów postojów pieca, obniżenie kosztów związanych z logistyką materiałów ogniotrwałych i zwiększenie efektywności produkcji.

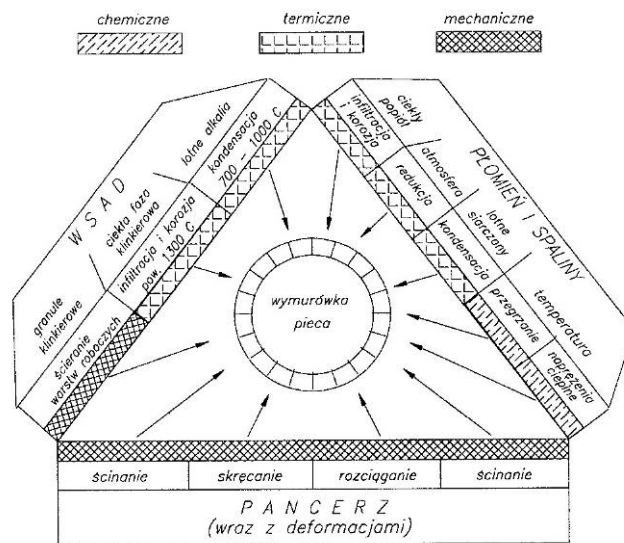
#### 4. Wykorzystanie sieci neuronowych do identyfikacji stanu wymurówki w piecu

Na niską żywotność materiałów ogniotrwałych w piecu obrotowym mają wpływ czynniki mechaniczne i cieplne. Do mechanicznych, wynikających z dużych średnic pieca (4-6m) zaliczyć można:

- małe zaklinowanie kształtek ( mały kąt pochylenia ścianek cegły ),
- owalizację płaszcza pieca.

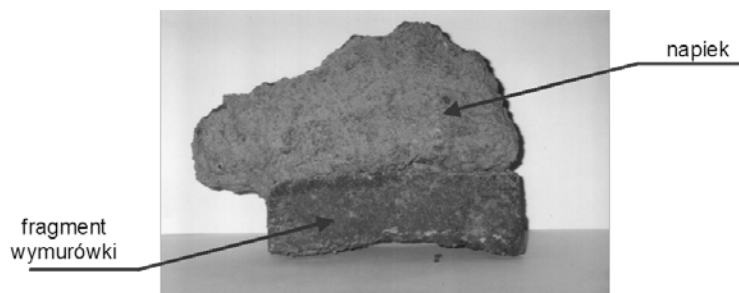
Natomiast cieplne to głównie wysokie obciążenie termiczne strefy spiekania, które jest wynikiem stosowanej technologii wypalania, rodzaju płomienia i wypełnienia pieca. Ważnym czynnikiem wpływającym na trwałość wykładziny ogniotrwałej pieca obrotowego jest napiek ochronny, który chroni wymurówkę przed oddziaływaniem wysokiej temperatury. Napiek powstaje na wymurówce w wyniku procesów fizykochemicznych zachodzących na granicy materiału ogniotrwałego i klinkieru. Tworzy się on w wyniku adhezji i zwilżania materiału ogniotrwałego przez klinkierową fazę ciekłą. Na rys.9. przedstawiono specyfikację niekorzystnych oddziaływań jakie wpływają na degradację wykładziny ogniotrwałej w piecu obrotowym.





Rys. 9. Specyfikacja oddziaływań degradujących wykładzinę ogniotrwałą w piecu obrotowym do wypalania klinkieru [4]

Oprócz wysokiej temperatury, duży wpływ na degradację wymurówki ma przemieszczanie się materiału w piecu. Piec obrotowy jest urządzeniem, w którym zachodzi jednocześnie wiele różnych z natury procesów fizyko-chemicznych. Oprócz komory spalania pełni funkcję: przeciwprądowego wymiennika ciepła, reaktora chemicznego (reakcje egzotermiczne i endotermiczne) oraz transportera mechanicznego wypalanego materiału. Wszystkie te procesy mają niekorzystny wpływ na wymurówkę pieca i jej trwałość.



Rys. 10. Zdjęcie napieku z oderwanym fragmentem wymurówki

Bieżąca ocena stanu wymurówki w piecu obrotowym nie jest sprawą prostą. Temperatura gazów w najgorętszej strefie pieca oscyluje w granicy 2200K, a temperatura wypalanego surowca -1700K. Dodatkowym czynnikiem utrudniającym ocenę stanu wymurówki jest tworzący się na niej napiek, którego grubość jest zmienna w czasie. Napiek, kiedy jest trwały, chroni wymurówkę przed agresywnym działaniem gorących gazów i zsuwającej się po niej mieszaniny surowcowej. W niektórych strefach pieca napiek ochronny jest nietrwały i okresowo odpadając powoduje stopniową degradację wymurówki

poprzez odpryskiwanie jej wierzchniej warstwy. Bardzo często jednak w tych miejscach tworzy się nowa warstwa napieku, pozwalająca na dalsze prowadzenie procesu wypalania. Na rys.10 przedstawiono zdjęcie napieku z oderwanym fragmentem wymurówki.

Zdarza się także, że napiek jest na tyle silnie związany z wymurówką, że odpadając powoduje wypadnięcie całych fragmentów izolacji ogniotrwalej. Prowadzi to do nagłego i szybszego niszczenia wykładziny ogniotrwalej. Przy pewnych wartościach grubości wymurówki lub wręcz jej braku, straty ciepła do otoczenia są zbyt duże. Konsekwencją takiej sytuacji jest narażenie stalowego płaszcza pieca na przegrzanie i deformację. Na rys.11 przedstawiono zagrożenia jakie mogą wystąpić w wyniku uszkodzenia wymurówki w piecu. W wyniku takich zjawisk koniecznym staje się zatem zatrzymanie procesu wypalania klinkieru i wymiana wyeksploatowanego fragmentu wykładziny ogniotrwalej.



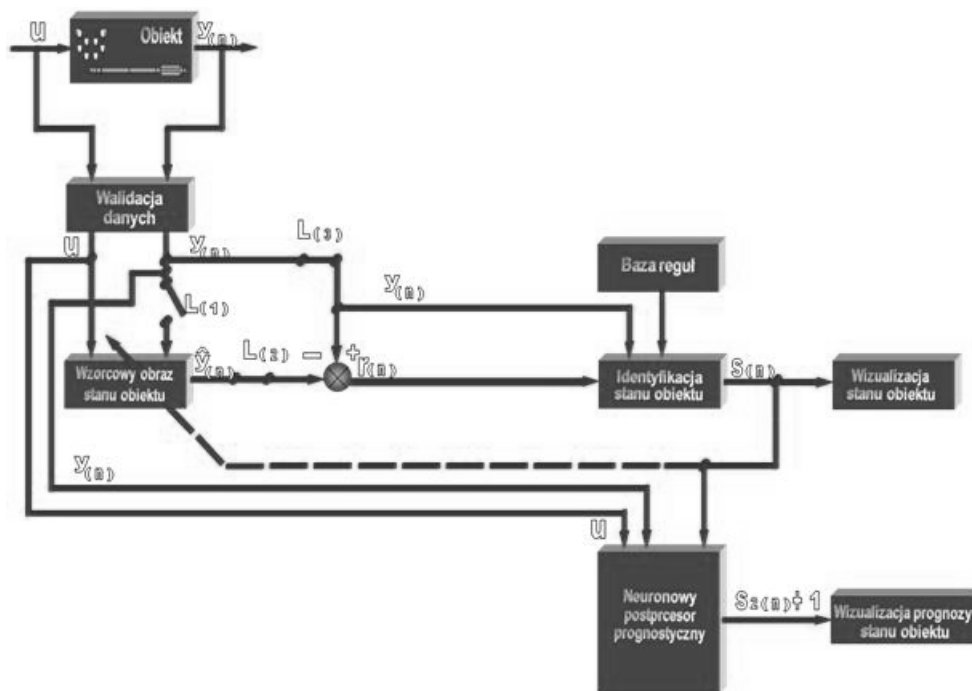
Rys. 11. Przykład przegrzania i deformacji płaszcza pieca na skutek awarii wymurówki

Opracowany w Opolskim Oddziale Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych system ekspertowo-neuronowy, który wykorzystując rejestrowane dane pomiarowe z systemów monitorowania linii wypalania klinkieru, pozwala na bieżącą ocenę stanu wymurówki, a także przewiduje z 5 dniowym wyprzedzeniem wystąpienie sytuacji awaryjnych wymurówki w piecu obrotowym. Schemat blokowy systemu ekspertowo-neuronowego przedstawiono na rys. 12 [2].

Dane pomiarowe pochodzące z obiektu zawierają pewien procent szumów, są niepełne lub po chwilowej przerwie w łączności wpisana zostaje data pomiaru i powtórzona linia z wyróżnikami danych pomiarowych. Takie tzw. „śmieci” nie nadają się do analizy przez system ekspertowy i muszą zostać wcześniej wykryte. Do tego celu służy umieszczony na schemacie blok „Walidacja danych”.

Warunkiem niezbędnym do realizacji bieżącej identyfikacji grubości napieku i degradacji wymurówki jest możliwość analizy obiektu (pieca obrotowego) od momentu jego pierwszego uruchomienia po zabudowie warstwą izolacji ogniotrwalej. Związane jest to z koniecznością zachowania w odpowiedniej chwili czasowej danych odniesienia, czyli tzw. „wzorcowego obrazu stanu obiektu”.

Po zachowaniu wzorcowego obrazu stanu obiektu zostaje otwarte połączenie  $L_1$  przy jednoczesnym zamknięciu połączeń  $L_2$  i  $L_3$ . Otwarcie połączenia  $L_1$  odcina możliwość zmiany tą drogą długości wektora wyjściowego  $\hat{y}_{(n)}$  we wzorcowym obrazie stanu obiektu. Natomiast zamknięcie połączeń  $L_2$  i  $L_3$  umożliwia bieżącą analizę stanu obiektu.



Rys. 12. Schemat blokowy systemu ekspertowo-neuronowego umożliwiającego bieżące wnioskowanie oraz prognozowanie grubości wykładziny ogniotrwalej w piecu obrotowym

Po zamknięciu połączeń  $L_2$  i  $L_3$  wyznaczone są residua, poprzez porównywane sygnałów na wyjściu obiektu ( $y(n)$ ) z sygnałami wyjściowymi generowanymi przez wzorcowy obraz stanu obiektu ( $\hat{y}(n)$ ). Residua odzwierciedlają ewentualne rozbieżności między obserwowanym funkcjonowaniem obiektu, a zachowaniem normalnym określonym przez zapamiętany obraz wzorcowy jego stanu. Zerowa (bliska zero) wartość otrzymanego sygnału (residuum) jest symptomem niezmiennej „formy” pracującego obiektu. Wartość residuum znacznie różniąca się od zera jest symptomem wystąpieniu zmian w stanie obiektu – degradacją wymurówki, bądź narastaniem lub zmianą grubości napieku.

Wygenerowane residua, będąc symptomami możliwych zmian stanu obiektu, są wykorzystane do odwzorowania jego bieżącej sytuacji. Odbywa się to w module „Identyfikacji stanu obiektu”, z uwzględnieniem wiedzy eksperckiej - zapisanej w postaci założeń sterujących algorytmem obliczania grubości napieku i wymurówki (bazy reguł). W module tym rozpatrywana jest relacja odwrotna, tzn. relacja typu *implikacja – przyczyna* i wyznaczany jest aktualny stan obiektu ( $s(n)$ ).

W tym celu rozpoznawane są dwa zjawiska:

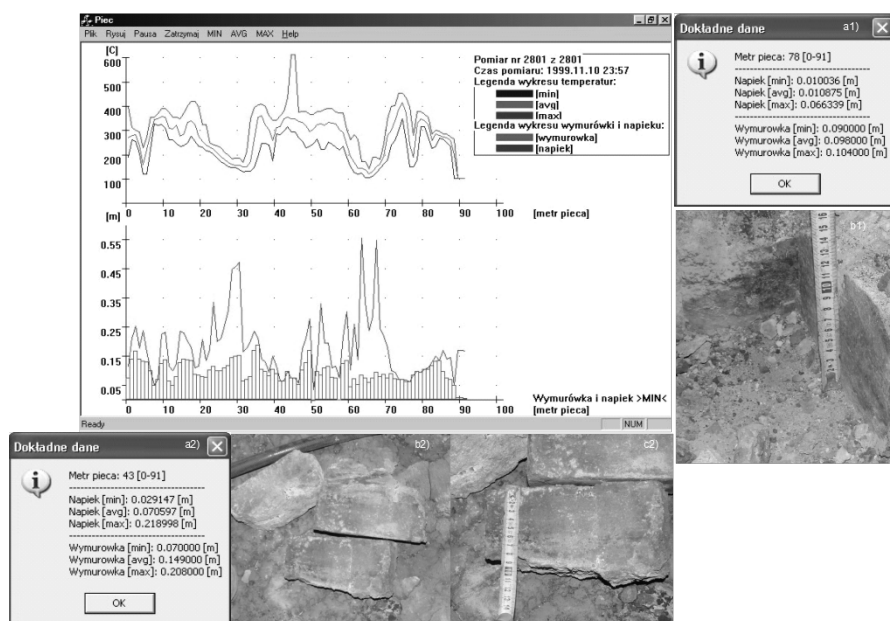
- zmiana grubości napieku ochronnego na powierzchni wymurówki i wyznaczenie ( $s_{1(n)}$ )
- zmniejszenie grubości warstwy wymurówki pieca obrotowego i wyznaczenie ( $s_{2(n)}$ )

Do przeprowadzenia wyżej wymienionych procesów obliczeniowych niezbędna jest znajomość zmiennych wyjściowych obiektu ( $y(n)$ ).

Po identyfikacji zmiany stanu obiektu, związanego ze zmniejszeniem grubości wymurówki, zostaje wprowadzona odpowiednia korekta we wcześniej zachowanym wzorcowym obrazie stanu obiektu. Wyniki dokonanych analiz są przedstawione graficznie na ekranie komputera.

## 5. Ocena systemu ekspertowo-neuronowego

Efekty analiz uzyskanych za pośrednictwem systemu ekspertowo-neuronowego zostały potwierdzone pomiarami wykonanymi we wnętrzu pieca po zatrzymaniu go na bieżący remont wykładziny ogniotrwalej. Pomiary te przeprowadzono trzykrotnie – podczas postojów pieca w różnych okresach roku. Pomiary wymurówki były dokonane metrowką najczęściej w miejscach sąsiadujących bezpośrednio z wykutymi obszarami zużytej izolacji lub poprzez pomiar grubości odkutych zużytych kształtek. Pomiar napieku na powierzchni wymurówki dotyczył miejsc gdzie napiek wykazywał maksymalną grubość na obwodzie pieca w danym obszarze. Rozbieżności w wynikach pomiarów rzeczywistych oraz określonej grubości warstwy izolacji przez system ekspertowo-neuronowy nie przekraczały 10 %.



Rys. 13. Widok okna przedstawiającego mapę synoptyczną z uwidocznionym miejscem awarii wymurówki w strefie spiekania (ok. 18 mb oraz pomierzy 42 a 46 mb) oraz w strefie dekarbonizacji (powyżej 70 mb) a1 i a2) dokładne dane grubości napieku i wymurówki 78 i 43 mb wypracowane przez program PIEC\_2001,b1) zdjęcie z pomiaru napieku (78 mb) dokonanego we wnętrzu pieca w trakcie remontu,b2) zdjęcie odkutych zużytych kształtek wymurówki (43mb) dokonane we wnętrzu pieca w trakcie remontu, c2) zdjęcie z pomiaru grubości odkutych kształtek wymurówki (43mb) dokonanego we wnętrzu pieca w trakcie remontu

Jako przykład, na rys. 13. przedstawiono mapę synoptyczną wypracowaną przez system ekspertowo-neuronowy, która obrazuje sytuacje awaryjne wymurówki w strefie spiekania (ok. 18 mb i pomiędzy 42 a 46 mb) oraz w strefie dekarbonizacji (powyżej 70 mb). Rysunek w części a1) i b1) dotyczy awarii w strefie dekarbonizacji i przedstawia odpowiednio: wyniki analizy grubości wymurówki i napięku dla 78 mb, opracowane przez system ekspertowy (a1) oraz rzeczywiste pomiary wymurówki dokonane we wnętrzu pieca obrotowego (b1). Rysunek w części a2) i b2) oraz c2) dotyczy awarii w strefie spiekania i przedstawia odpowiednio: wyniki analizy grubości wymurówki i napięku dla 43 mb opracowane przez system ekspertowo neuronowy (a2) oraz rzeczywiste pomiary wymurówki we wnętrzu pieca (b2 i c2).

Nie zawsze bieżąca wiedza na temat grubości wymurówki i napięku wystarcza aby wcześniej przygotować się do awarii wymurówki i skrócenia do minimum czas postoju pieca. System ekspertowo-neuronowy wyposażony został dodatkowo w moduł luźno powiązanego postprocesora neuronowego, umożliwiającego prognozowanie z 5 dniowym horyzontem czasowym, grubość wymurówki w piecu obrotowym. Moduł neuronowego postprocesora prognostycznego (SNN) docelowo składa się z „n” sieci neuronowych (jednokierunkowych sieci wielowarstwowych (Multi-Layer Perceptrons) o strukturze 110 neuronów wejściowych, 17 neuronów ukrytych i 3 neurony wyjściowe) - jedna struktura neuronowa dla każdego metra długości pieca obrotowego. Każda z sieci posiadała 3 wyjścia, przedstawiające prognozowaną rodzinę stanów obiektu ( $s_{2(n)_{min}+1}$ ), ( $s_{2(n)_{max}+1}$ ), ( $s_{2(n)_{avg}+1}$ ) (czyli wartości minimalnej, maksymalnej i średniej grubości wymurówki na danym metrze). Na wejścia sieci podawane są zarówno, odpowiednio przygotowane po procesie walidacji, zbiory danych wejściowych ( $u$ ) i wyjściowych ( $y_{(n)}$ ) jak również historia zbiorów stanów ( $s_{(n)}$ ) wypracowana podczas bieżącej identyfikacji obiektu, przez system ekspertowy. Modelowanie architektur neuronowych przeprowadzono z wykorzystaniem aplikacji Statistica Neural Network wersja 3.0.

Aby potwierdzić jakość prognozowania, ocenę trafności prognoz analizowano w dwóch kategoriach:

Pierwsza polegała na ocenie trafności prognoz dotyczących grubości wymurówki. W tej kategorii oceniano błąd pomiędzy prognozowaną przez moduł postprocesora neuronowego grubością wymurówki a obliczoną wartością tego parametru na podstawie bieżących danych pomiarowych zarejestrowanych na obiekcie. Dodatkowo określono również tzw. Error Mean czyli średnią różnicę bezwzględną pomiędzy prognozowaną i rzeczywistą wielkością grubości wymurówki oraz Error S.D. czyli średnią wartość odchylenia standardowego błędów dla prognozowanej grubości wymurówki. Wartości te pozwalają ocenić jak duża jest rozbieżność pomiędzy prognozowanymi i rzeczywistymi wartościami. Potwierdzają również czy uzyskane wyniki prognozy są dziełem przypadku czy stałą tendencją. Aby określić sumaryczny błąd sieci neuronowych posłużono się tzw. błędem RMS. Analizując wartości błędu RMS można zorientować się na ile dokładnie sieci w systemie diagnostyczno-prognostycznym realizują stawiane zadania.

Druga polegała na ocenie trafności prognoz dotyczących sytuacji awaryjnych pieca. W tej kategorii oceniana była procentowa trafność prognoz dotyczących sytuacji awaryjnych wymurówki kończących się zatrzymaniem pieca i bieżącym remontem. Oceniana też była tzw. nadinterpretacyjność sytuacji awaryjnych, a więc procentowy udział przewidzianych awarii, które nie miały miejsca, w stosunku do zaistniałych awarii rzeczywistych. Należy tutaj zwrócić uwagę na fakt, częstotliwości występowania awarii wykładziny ogniotrwałej w poszczególnych strefach pieca. Najwięcej bo 60% wszystkich awarii zaistniało w strefie chłodzenia. W strefie spiekania zaistniało 32% awarii, a w strefie kalcynacji tylko 8 %

wszystkich awarii. Przedstawione procentowe wartości trafności i nadinterpretacyjności prognoz w poszczególnych strefach odnoszą się do faktycznie zaistniałych sytuacji awaryjnych w danej strefie. System ekspertowo-neuronowy testowano danymi pomiarowym rejestrowanymi w cementowni przez okres 1 roku.

W obu kategoriach trafność prognozy podawano jako średnią dla całej długości pieca. Aby lepiej zobrazować rozkład błędów, piec podzielono na strefy pokrywające się z tzw. strefami technologicznymi. Każda ze stref poddana została odrębnej analizie.

Dla pierwszej kategorii oceny system ekspertowo neuronowy uzyskał dokładność prognozy grubości wymurówki dla całego pieca wynoszącą 71,04 %. Dla drugiej kategorii oceny - uzyskał trafność przewidywania sytuacji awaryjnych na poziomie 92% oraz 12 % nadinterpretacyjność w prognozowaniu sytuacji awaryjnych w odniesieniu do całej długości pieca. W tym miejscu warto zwrócić uwagę na dokładność prognoz w poszczególnych technologicznych strefach pieca. Dla pierwszej kategorii porównania trafność prognozy dla strefy spiekania wyniosła – 83,50%, dla kalcynacji – 65,22%, a dla strefy chłodzenia – 64,40%.

Dla drugiej kategorii porównania dokładność prognoz w podziale na poszczególne strefy technologiczne wyniosła:

- dla strefy spiekania – trafność przewidywania sytuacji awaryjnych: 87,5 %.
- skłonność do nadinterpretacji awarii wykładziny ogniotrwałej: 12,5 %.
- dla strefy kalcynacji – trafność przewidywania sytuacji awaryjnych: 100 %.
- skłonność do nadinterpretacji awarii wykładziny ogniotrwałej: 50 %  
(Należy zwrócić w tym miejscu uwagę, że w strefie kalcynacji odnotowano tylko 8% wszystkich awarii wymurówki w piecu, a powyższe wyniki trafności podawane są w stosunku do ilości awarii w danej strefie. Dlatego każde niewykrycie lub błędne wykrycie sytuacji awaryjnej stanowi duży udział procentowy w stosunku do wszystkich zaistniałych awarii w danej strefie).
- dla strefy chłodzenia – trafność przewidywania sytuacji awaryjnych: 93,33 %.
- skłonność do nadinterpretacji awarii wykładziny ogniotrwałej: 6,67 %

Na podstawie uzyskanych wyników można wnioskować, że opracowany system diagnostyczno-prognostyczny sprawdzi się w wykrywaniu i przewidywaniu stanów awaryjnych pieców obrotowych i okaże się ważnym elementem doradczym dla obsługi technologicznej w cementowni.

## 6. Podsumowanie

Koszt materiałów ogniotrwałych i prac związanych z remontami wymurówki pieca obrotowego jest jednym z ważniejszych składników kosztów produkcji cementu. W związku z tym działania dotyczące wydłużenia czasu pracy wymurówki wewnątrz pieca oraz obniżenie kosztów logistycznych dotyczących materiałów ogniotrwałych, należą do ważniejszych zadań cementowni.

Identyfikacja stanu wyłożenia wnętrza pieca obrotowego materiałami ogniotrwałymi ma duże znaczenie nie tylko w czasie eksploatacji pieca oraz przygotowania jego remontu. Wpływa również na strukturę procesu logistycznego związanego z remontem wymurówki.

Ze względu na warunki technologiczne: wysoką temperaturę, ruch obrotowy i cykliczną zmianę grubości napieku ochronnego identyfikacja stanu wymurówki jest procesem złożonym i trudnym do zrealizowania przy zastosowaniu istniejących metod pomiarowych.

Stosowane powszechnie pomiary temperatury płaszcza pieca, pozwalają tylko na stwierdzenie przegrzania walczaka pieca w wyniku uszkodzenia wymurówki. Natomiast nie dostarczają żadnych konkretnych informacji na temat rzeczywistej grubości wymurówki i napięku ochronnego, w trakcie jego eksploatacji. Opracowany system ekspertowo-neuronowy pozwala nie tylko na szybkie wykrycie sytuacji awaryjnych i stref przegrzania pieca obrotowego, ale również na bieżącą obserwację i prognozę tendencji zmian (degradację) materiałów ogniotrwałych. Umożliwia służbom technologicznym cementowni na osobne monitorowanie grubości warstw izolacyjnych w piecu, wcześniejszą ocenę przydatności wymurówki do pracy i przygotowanie logistyczne do ewentualnego remontu wykładziny ogniotrwałej.

Zastosowanie w przemyśle cementowym opracowanego systemu ekspertowo-neuronowego pozwoli na wcześniejsze przygotowanie się do awarii wymurówki oraz ograniczenie do minimum czasów postojów pieców związanych z pracami remontowymi wymurówki, a tym samym na zmniejszenie strat w produkcji klinkieru i obniżenie kosztów produkcji cementu. Stwarza też możliwość zastosowania zarządzania logistycznego dotyczącego materiałów ogniotrwałych w cementowni.

#### **Literatura**

1. Duda J.; „Energoszczędne i proekologiczne techniki wypalania klinkieru cementowego”, Prace IMMB ,Opole 2004,
2. Siemiątkowski G.; Wykorzystanie pomiaru temperatury płaszcza pieca obrotowego do oceny stanu wymurówki, PO, Opole 2011, praca doktorska.
3. McDougall T.; "Temperature monitoring technology" World Cement, August 2006, pp.41-44,
4. Szczerba J., Piech J.; "Materiały ogniotrwałe w piecach obrotowych przemysłu cementowego" poradnik użytkownika, ZM Robczyce S.A., Kraków- Robczyce 1996,

Dr hab. inż. Jerzy DUDA, prof. PO  
Instytut Innowacyjności Procesów i Produktów  
Politechnika Opolska,  
45-370 Opole, ul. Ozimska 75  
tel: 77 423 40 44  
email: j.duda@po.opole.pl

Dr inż. Grzegorz SIEMIĄTKOWSKI  
Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych w W-wie, Oddz. Opole  
45-641 Opole, ul. Oświęcimska 21  
tel: 77 456 32 01  
email: g.siemiatkowski@icimb.pl