



AKADEMIA GÓRNICZO – HUTNICZA
im. Stanisława Staszica
w Krakowie



**WYDZIAŁ INŻYNIERII METALI
I INFORMATYKI PRZEMYSŁOWEJ**

Prof. dr hab. inż. Andrzej Łędzki
Dr inż. Arkadiusz Klimczyk
Dr inż. Ryszard Stachura
Dr inż. Mikołaj Bernasowski
Dr inż. Piotr Migas

TECHNOLOGIA, STEROWANIE I AUTOMATYZACJA PROCESÓW WYTWARZANIA ŻELAZA

/do użytku wewnętrznego AGH/

Studia magisterskie, Semestr II

I. Wsad do wielkich pieców.

I.1. Kompleks produkcyjny spiekalnia-wielkie piece – stan aktualny.

I.1.1. Wprowadzenie.

Aktualnie i przynajmniej do 2020 r uznaje się, że najbardziej ekonomiczna i technologicznie najbardziej uzasadniona jest produkcja surowej stali w linii: spiekalnia (ewentualnie grudkowania), wielkie piece i konwertor tlenowy lub piec elektryczny. W tej linii ze względów ekonomicznych i ekologicznych dąży się bez przerwy do zmniejszenia zużycia paliwa, ograniczenia emisji pyłów i gazów oraz zmniejszenia odpadów stałych. Ponieważ w w/w linii produkcji stali surowej spiekania i wielkie piece zużywają ok. 80% energii (dla wyprodukowania surowej stali), w tych technologiach poszukuje się oszczędności, zakładając jednocześnie stały lub lepszy poziom jakości spieku, surówki żelaza czy stali.

Spiekalnia produkując spiek jako wsad specjalnie przygotowany dla wielkich pieców zobowiązana jest spełniać warunki jakościowe spieku dyktowane przez wielkie piece. Podobnie musi być skoordynowana z wielkimi piecami masa produkowanego spieku.

Do połowy lat sześćdziesiątych produkowano spiek o zasadowości od 0,9 do 1,05, a zatem spieki zwane kwaśnymi i nieznacznie zasadowymi. Dalsza poprawa technologii wielkopiecowej zmusiła spiekalników na przełomie lat siedemdziesiątych do produkcji tzw. spieku samotopliwego o stosunku CaO/SiO_2 (zasadowości) od ok. 1,05 do 1,2. Pozwalało to ożuzłować krzemionkę popiołu koksu, przez co zminimalizowano udział surowego topnika we wsadzie wielkich pieców. Eliminacja surowych węglanowych topników ze wsadu wielkopiecowego jest jednym z najważniejszych celów obniżenia zużycia energii, bowiem np. na rozkład 100kg kamienia wapiennego na tonę surówki zużywa się dodatkowo ok. 30kg koksu. Dla małej huty produkującej ok. 1 mln t surówki oznacza to zmniejszenie kosztów o ok. (30.000 t/rok x 450 dolarów USA) dolarów USA 13,5 mln US Dolar lub ok. 7 mln Euro/rok (2008).

Wyliminować surowy topnik można tylko wtedy kiedy we wsadzie stosuje się wyłącznie spiek samotopliwy bez udziału żelazodajnych tworzyw kwaśnych. Zwykle jednak tak duża produkcja spieku samotopliwego pociąga za sobą bardzo dużą emisję gazów i pyłów. Właśnie z powodów ekologicznych jak również dużej dostępności grudek ogranicza się produkcję spieku poprzez zmniejszenie ilości pracujących taśm produkujących spiek. Z coraz bardziej dostępnych na rynku grudek najwięcej jest jednak kwaśnych czyli pod względem wartości metalurgicznej najmniej przydatnych dla procesu wielkopiecowego. Są one jednak najtańsze, a często tańsze od produkowanego spieku. Pojawia się zatem szereg wariantów struktury wsadu wielkopiecowego, a mianowicie:

- a. produkcja surówki żelaza wyłącznie na spieku samotopliwym bez dodatku surowych topników węglanowych. Wariant ten powoduje dużą emisję gazów i pyłów na spiekalni i ze względów ekologicznych jest on aktualnie powoli wycofywany,
- b. produkcja surówki żelaza wyłącznie na grudkach z dużym dodatkiem surowych topników celem odsiarczania surówki w wielkim piecu. Produkcja ta jest energochłonna a zatem nieekonomiczna ale proekologiczna bowiem eliminuje pracę spiekalni,
- c. produkcja surówki żelaza jak w pkt. b, ale bez udziału topników surowych. Surówka ta jest zasiarczona i musi być pozapiecowo odsiarczana. Wymaga to dużych nakładów na budowę agregatów odsiarczających oraz nakładów ponoszonych na odsiarczanie w tych agregatach. Wariant ten stosowany jest głównie w USA, Kanadzie i Szwecji i wg. wyliczeń tamtejszych koncernów koszt surówki porównywalny jest w przedstawionym poniżej wariantcie „a”,
- d. produkcja surówki żelaza z wsadu złożonego ze spieku samotopliwego i grudek zasadowych. Jest to technologia porównywalna z prezentowaną w pkt. „a”. Jest ona proekologiczna (bo mniej produkuje się spieku) ale droższa. Może ona być stosowana z powodzeniem tylko wtedy, kiedy zmniejszenie kosztów, kar i opłat ekologicznych pokrywa różnicę cen pomiędzy drogimi grudkami zasadowymi, a spiekiem,

- e. produkcja surówki z grudek mało kwaśnych ok. 80-90% i spieku ok. 10-20%, który pełni rolę topnika. Spiekalnia produkuje mało bogaty w żelazo i w małej ilości spiek, głównie z odpadów hutniczych. Odsiarczanie odbywa się poza wielkim piecem. Efekt pozytywny jest zarówno ekonomiczny jak i podwójnie proekologiczny (likwidacja odpadów i emisji gazowych). Wariant ten w przypadku jak w USA (Mittal) o dużej dostępności do własnych tanich grudek jest najwyżej oceniany przez metalurgów, ekologów i ekonomistów,
- f. produkcja surówki żelaza ze spieku wysokozasadowego i tanich grudek kwaśnych lub odsiarczanych najtańszych rud surowych. Zasadowość spieku określa się pomiędzy 1,4 a 2,5 w zależności od kwaśności grudek. Taki wariant stosują koncerny USS w USA, Thyssen w RFN, Mittal we Francji, oceniając go jako docelowy. wariant ten jest stale modernizowany technologicznie a każdy koncern ma swoją własną technologię w zależności od posiadanych agregatów, poziomu konstrukcyjnego urządzeń przeciwdziałających emisji a głównie od cen i dostępności na danym rynku grudek i innych tworzyw żelazodajnych.

Ten ostatni wariant dostosowany do warunków technicznych, małych możliwości finansowych inwestowania oraz środków na zakup tworzyw został wybrany w strategii rozwoju huty za docelowy w Mittal-Steel Poland (w HTs w 1995 r i w H. Katowice lata 2000)

I.1.2. Logistyka wsadowa w świecie i w Polsce przy produkcji surówki żelaza.

W każdej hucie pracę spiekalni określają wymogi stawiane przez wielkie piece. Dotyczy to zarówno ilości, jakości oraz rodzaju produkowanego spieku.

Aktualnie w światowym hutnictwie w nowoczesnych wielkich piecach stosuje się prawie wyłącznie wsad przygotowany. Wsad ten składa się głównie ze spieku i grudek. W niewielkim jedynie stopniu jako dodatek do spieku stosuje się – bardzo dokładnie odsiane, bogate w żelazo o neutralnej zasadowo skale płonnej – rudy surowe. W światowym wielkopiecownictwie jako podstawowy więc wariant wsadowy przyjmuje się:

- spiek w ilości od 100 do 50% masy wsadu żelazodajnego,
- grudki w ilości od 0-50% masy wsadu żelazodajnego,

W Niemczech udział spieku rudnego wynosi od 52-60% (średnio 55,8%), grudek 31,3%, natomiast rud kawałkowych odsianych od 10 do 15% (średnio 12,9%). W poszczególnych koncernach niemieckich udział ten był następujący:

- Thyssen Stahl Krupp Sthal AG – ok. 65% spieku, 23% grudek, 17% rud kawałkowych,

Wariant ten jest stosowany jako główny u największych producentów surówki i stali w świecie tj. Japonii, USA, Rosji, Ukrainy, Niemiec, Wielkiej Brytanii, Korei i Beneluksu. Stosują oni ten wariant dlatego, że wg danych niemieckich wprowadzenie każdego jednego procentu spieku do wsadu obniża koszt produkcji surówki o 0,26%. Dane z hut USA przyjmują obniżenie kosztu produkcji surówki na poziomie 0,2% na 1% spieku. Przyjmuje się w tym wariantcie spiek bogaty w żelazo tj. od 55 do 59%, zwykle o wysokiej zasadowości bliskiej 2, jeśli udział grudek jest wysoki tj. od 20-50%. Im spiek zawiera mniej żelaza tym zużycie jego jest mniejsze a grudek większe.

Drugi wariant stosowany w Kanadzie (Dofasco), Szwecji (Lulea), USA (Garry, LTV) przewiduje pracę pieców na 100% udziale grudek lub około 20% spieku i 80% grudek. Huty te wykorzystują własną bazę rud nadających się jedynie do grudkowania. Podstawowym problemem tej technologii jest niska jednostkowa masa żużła wynosząca od 180 do 240 kg/Mg sur. Z jednej strony prowadzi to do zmniejszenia jednostkowego zużycia paliwa (topi się o połowę mniej materiałów żużlotwórczych), z drugiej strony produkuje się surówki złe jakościowo tj. o zawartości:

- siarki od 0,056 do 0,12%
- Si jedynie powyżej 0,6%,
- Mn jedynie powyżej 0,6%.

Technologia ta wymaga jednak dodatkowo jedno lub dwustopniowego odsiarczania poza wielkim piecem. Oznacza to z kolei:

- budowę kosztownej instalacji do samego procesu odsiarczania jak i do utylizacji pyłów i gazów powstających w czasie tego procesu,

- zużycia ok. 3-5kg ton surówki czynnika odsiarczającego (40% CaO i 60% CaC₂) o stopniu czystości 80% wdmuchiwanym w atmosferze azotu, ew. stosowanie bardzo drogiego magnezu.

Z powyższych powodów technologia ta uznawana jest jedynie za lokalną. Stwierdzić tutaj należy, że technologii z wyższym niż 50% udziałem grudek we wsadzie wielkopiecowym nie stosuje się nawet u największego producenta grudek w świecie jakim jest Brazylia. Świadczy o tym fakt wybudowania dla pieca o pojemności użytecznej 4515 m³ zadmuchanego w 1983 r taśmy spiekalniczej o powierzchni 440 m². Stosuje się tam wsad do wielkich pieców złożony z 85% spieku i 15% grudek własnych i tylko sporadycznie zwiększa się udział grudek przy remoncie taśmy.

W dawnej HTS przyjęto taki kierunek dotyczący wsadu w którym stosowano spiek (20-75%) i grudki (80-25%) przyjęty w technologii wielkopiecowej na najbliższe lata. celowym jest jego dalsza kontynuacja nawet na najbliższe 15 lat z stopniową minimalizacją produkcji spieku ze względu na dużą emisję gazów i pyłów w spiekalni. Ma to swoje uzasadnienie zarówno w wymaganiach technologicznych dotyczących wsadu wielkopiecowego oraz ekonomicznych (łącznie koszt produkcji surówki dotyczyć powinien wielkich pieców i spiekalni łącznie) jak również ekologicznych (utylicacja na taśmach spiekalniczych odpadów stałych huty).

I.1.2.1. Jakość spieku

Spiek rudny ze względu na swoje własności (fizyczne i chemiczne) w pełni odpowiada wymogom procesu wielkopiecowego we wszystkich trzech funkcjach charakterystycznych dla jego prawidłowego przebiegu tj.: przewodności, redukcji oraz wymianie ciepła i masy. Stosowanie spieku rudnego o odpowiedniej zasadowości zależnej od rodzaju zużywanych grudek (zwykle kwaśnych) pozwala na wyeliminowanie surowych topników węglanowych, a głównie kamienia wapiennego. Pozwala to również na stabilną pracę pieca i łatwą wymianę ciepła i masy, co w konsekwencji najbardziej ze wszystkich czynników obniża zużycie energii w wielkim piecu. Już eliminacja tylko 1 kg kamienia wapiennego na tonę surówki ze wsadu wielkopiecowego prowadzi do oszczędności paliwa koksowego o 0,3 kg/t sur, co w konsekwencji – przy produkcji wielkich pieców rocznie ok. 2 mln ton surówki i cenach z początku 2007 - daje efekt ekonomiczny ok. 2,3 mld złotych. Wysoką jakość spieku zagwarantować może jedynie stosowanie rud bogatych, które z kolei są również przedmiotem rosnących wymagań co do dokładności składu chemicznego i składu granulometrycznego. Niemal wszystkie rudy drobne i koncentraty stosowane w RFN przechodzą w kopalniach mniej lub bardziej złożony proces przygotowań. Rudy drobne i koncentraty, które mają być spiekane miesza się z dodatkami, które mogą zawierać potrzebne składniki zasadowe i regulować określony skład żużla w procesie wielkopiecowym i które dodatkowo wpływają na produkcję i jakość spieku. Dodatki mogą zawierać kamień wapienny, wapno palone, dolomit, oliwin, piasek oraz rude krzemionkową. Wapno palone(10-25 kg/t spieku) stosuje się głównie dla zwiększenia uzysku spieku. Na początku lat osiemdziesiątych próby zmniejszenia zużycia paliwa doprowadziły do tego, że dolomit będący nośnikiem MgO został całkowicie zastąpiony przez oliwin. Piasek i rudę krzemionkową stosuje się jedynie dla dokładnego wyregulowania określonej zawartości SiO₂. Stosowanie żużla konwertorowego w postaci kawałkowej lub granulowanej ma również wpływ na stosowanie pewnych dodatków w produkcji spieku.

W spiekalniach możliwe jest przerabianie pewnych substancji zawracanych do obiegu w hutach żelaza i stali posiadających znaczne zawartości Fe, np. żużli konwertorowych, pyłu wielkopiecowego, odpadów surówki i zgorzeliny walcowniczej. Dzięki temu możliwe jest zmniejszenie ilości materiałów składowanych na hałdach. Cynk, ołów, fosfor, alkalia, związki organiczne w materiałach zawracanych do obiegu wpływają szkodliwie na sprawność elektrofiltrów, lub mogą być niepożądane jako składniki spieku dla procesu wielkopiecowego. W związku z tym ze względu na dużą zawartość fosforu stosowanie żużla z procesu LD w ostatnich latach zostało znacznie ograniczone lub wstrzymane.

Stosowanie we wsadzie wielkopieczowym spieku o wysokiej zasadowości, zawartości Fe nawet do ponad 59% odsianego powyżej 5 mm przy niskim FeO (4-6%) pozwala na:

- całkowite wyeliminowanie topników w stanie surowym ze wsadu wielkopieczowego,
- regulacje składu chemicznego żużla pod względem odsiarczającym tylko poprzez zmiany składu chemicznego spieku,
- wyeliminowanie surowego topnika ze wsadu wielkopieczowego i obniżenie FeO w spieku (bez obniżenia jego wytrzymałości) pozwala na znaczne obniżenie zużycia koksu w wielkim piecu,
- prawidłowe przygotowanie mieszanki spiekającej pod względem składu ziarnowego (kruszenie, sortowanie, domielenie i namiarowanie) pozwoliło w RFN na obniżenie zużycia koksiku z 74 do 36 kg/t spieku już w latach 1975-1988,
- duże znaczenie dla energetyki huty posiada odzysk ciepła z chłodni spieku, które jest używane w procesie spiekania do podgrzewania mieszanki i mediów do jej zapalania, a ponadto do wytwarzania pary zużywanej w hucie lub przerabianej na energię elektryczną.

I.1.2.2. Czynniki ekonomiczne

Z czynników technologicznych w kompleksie wielkie piece – spiekalnia wpływających na koszt produkcji jako główne zadanie należy przyjąć zasadę, że koszt surowki może być jeszcze dużo mniejszy nawet przy wzroście kosztu produkcji surowki, ale kompozycja wsadu na wielkich piecach musi być tak dobrana aby zapewnić odpowiednie niskie zużycie paliwa przy regulowanej intensywności pracy pieca i zapewnieniu takiej masy i składu żużla, która gwarantuje dobrą jakość surowki.

Oprócz jakości rud kawałkowych, spieku i grudek, czynnikiem decydującym o ilościach tych materiałów we wsadzie wielkopieczowym jest również cena. Powszechnie znaną rzeczą jest fakt, że większy udział spieku i grudek we wsadzie wielkopieczowym ma korzystny wpływ na zużycie paliwa, masę żużla i efektywność produkcji surowki. O udziale spieku i grudek we wsadzie wielkopieczowym decydują zdolności produkcji spieku danej huty, koszty produkcji spieku, oraz cena określonej jakości grudek na rynku światowym.

W samej RFN nie ma w eksploatacji żadnej wytwórni grudek. Przez ok. 10 lat wielkie piece firmy Thyssen Krupp pracowały na wsadzie złożonym 8-100% spieku przy czym udział spieku wynosił od 51%-79%. Widać wyraźnie, że w ciągu ostatnich 2-3 lat nastąpiło zmniejszenie udziału spieku, co było związane z korzystnymi cenami grudek i rud kawałkowych.

Szerzej o zagadnieniach technologicznych związanych z ograniczeniem emisji gazowej będzie mowa w dalszej części niniejszego rozdziału.

I.1.2.3. Czynniki ekologiczne

Produkcja spieku w całym świecie jest uważana za bardzo uciążliwą dla środowiska. Głównie dotyczy to emisji pyłów i gazów. Spiekalnia (nowoczesna) musi więc zapewnić taką technologię produkcji spieku (najtańszy kierunek) oraz być wyposażona w takie urządzenia oczyszczające spaliny aby dostosować się do światowych i lokalnych norm w emisji gazów i pyłów.

Z powyższego wynika, że kompleks przedsięwzięć technologiczno-modernizacyjnych poczynionych przez kierownictwo wydziału i dyrekcję dawnej huty im. Sendzimira przyniósł określone efekty, ale nie są one wystarczające. Efekty te jednak wymagają dalszego postępu ograniczającego głównie emisję gazową spiekalni. Dlatego też w niniejszym rozdziale rozpatrzone zostaną możliwości ograniczeń emisji gazowych spiekalni poprzez:

- dobór surowców wsadowych,
- przygotowanie surowców do spiekania,
- zmiany technologii.

Przykład.

Zastosowanie spieku wysokozasadowego i grudek kwaśnych we wsadzie wielkich pieców Huty im. T. Sendzimira w Krakowie. (lata 90-te jako hit europejski).

W światowym wielkopiecownictwie a głównie w Europie Zachodniej, od szeregu lat jako wsad wielkopieczowy stosuje się połączenie spieku kwaśnego z wysokozasadowym lub wysokozasadowego spieku z grudkami kwaśnymi czy też kawałkową rudę kwaśną. W krakowskiej Hucie im. T. Sendzimira zaistniała podobna sytuacja zmuszająca do stosowania wyżej wymienionej technologii z uwagi na ograniczanie produkcji spieku ze względów ekonomicznych. Dotrzymanie odpowiednich norm emisji szkodliwych składników spiekalni do atmosfery i gleby spowodowało ograniczenie pracujących dawniej 4-ch taśm do 2-ch lub jednej. Z uwagi na to, że w HTS nie było ciągów technologicznych zasilania każdej taśmy oddzielnie produkcja dwóch gatunków spieku jednocześnie jest niemożliwa. Duże trudności stwarzałoby również sortowanie kawałkowych rud kwaśnych, a zatem celowa wydaje się technologia stosowania spieku wysokozasadowego w połączeniu z grudkami kwaśnymi jako wsadu dla wielkich pieców. Proponuje się dla przykładu stosowanie grudek połtawskich, a w przyszłości grudek krzyworskich, co dla otrzymywania odpowiedniego składu żużła w wielkim piecu o dobrych własnościach odsiarczających wymusza niejako zasadowość spieku ($\text{CaO}:\text{SiO}_2$) w granicach 1,65 – 1,75 dla grudek połtawskich i 1,8 – 2,2 dla grudek krzyworskich, przy masie żużła około 320 kg/Mg surówki. W tej technologii dąży się również do minimalizacji topników surowych we wsadzie w celu osiągnięcia obniżenia zużycia koksu.

1 W zakresie produkcji spieku wysokozasadowego opanowano jego produkcję w sposób zadowalający

- uzyskując wyższe jednostkowe wyniki produkcyjne,
- obniżając zawartość FeO w spieku,
- uzyskując wzrost własności fizycznych spieku,
- ograniczając wahania w składzie chemicznym wsadu.

Do mankamentów należy zaliczyć:

- złe dozowanie tworzyw, co wpływa na rozrzut zawartości CaO i SiO_2 w spieku,
- zbyt wysokie zużycie paliwa.

2 W zakresie produkcji surówki osiągnięto:

- zmniejszenie zużycia koksu na obu piecach (rzeczywistego i skorygowanego),
- zwiększenie dobowej produkcji surówki (rzeczywistej i skorygowanej) na obu piecach,
- stabilizację składu chemicznego surówki przy znacznym obniżeniu zawartości Si w surówce o 0,33% na WP nr 3 i o 43% na WP 5; zawartości siarki, fosforu i manganu były stabilne na poziomie 0,023% S, 0,64% Mn i 0,09% P.

3 Pomimo wzrostu kosztów wsadu przy produkcji spieku (zgodnie z oczekiwaniami) nastąpiło zmniejszenie kosztu materiałów wsadowych (wraz z paliwami) użytych do produkcji surówki. Sumaryczne obniżenie kosztu w tej technologii wynosiło ok. 12 zł na 1 tonę surówki, co było efektem znaczącym biorąc pod uwagę planowaną produkcję surówki na poziomie 2,2 mln ton. Wstępne pomiary emisji pyłu i SO_2 w spiekalni wykazują również znaczące obniżenie emisji o ok. 20% dla pyłu i ok. 10% dla SO_2

Otrzymywany wysokozasadowy spiek posiada lepsze własności chemiczne i fizyczne od tradycyjnych spieków o zasadowości $\text{CaO}:\text{SiO}_2 \cong 1,1 - 1,3$. Zagadnienia te zostały przedstawione w pracy R. Benescha i innych. W oparciu o te badania oraz obliczenia symulacyjne zamiaru wielkopieczowego przyjęto następujące założenia: produkcję spieku o zasadowości $\text{CaO}:\text{SiO}_2 = 1,5 - 1,75$; bogactwo wsadu ogólnego na wielkich piecach nie powinno przekraczać 55,5%; masa jednostkowa żużła 320 kg/Mg sur, przy zasadowości $\text{CaO}:\text{SiO}_2 = 1,1$ i zawartości $\text{MgO} = 7\%$ oraz $\text{Al}_2\text{O}_3 = 7\%$; stosowanie surowego topnika jako minimalna korekta wsadu.

W recepturze wsadu spiekalnego używano: a) od 197 do 255 kg aglorudy A na tonę spieku, b) od 185 do 327 kg koncentratu GOK na tonę spieku, c) od 200 do 300 kg niskokrzemionkowej aglorudy

brazylijskiej na tonę speiku, d) od 147 do 175 kg kamienia wapiennego na tonę speiku, e) od 72 do 86 kg dolomitu na tonę speiku, f) koksiku ok. 65 kg na tonę speiku. Oprócz tego zużywano odpady w postaci: walcowiny (40kg), zendry mułku (80 kg), odsiewu speiku (50 kg) i żuźla stalowniczego (ok. 50kg).

Wyprodukowano speik o następujących średnich parametrach:

- Fe = 55,5% to jest dokładnie wg. założeń, przy standardowym odchyleniu $\pm 0,5\%$,
- FeO = 6,82% , wahania w granicach 6%-8%,
- CaO:SiO = 1,61; niestabilność poza zakresem założonym 1,5 do 1,7 wynosiła 11,4%,
- ISO – T = 75% a A = 4,5%, były to wskaźniki wyższe od wartości dla speiku produkowanego tradycyjnie (68%, 4,7%),
- wydajność jednostkowa ok. 1200 kg/m² godz (wyższa o ok. 150 kg),
- zużycie koksiku od 58 do 70 kg/Mg speiku – przy średniej na poziomie 64 kg tj. mniejsze niż dotychczas o 10,2 kg/Mg speiku,
- skład ziarnowy: 70,7% w granicach 10-40 mm,
15,1% w granicach 6,3 –10 mm,
6,4% w granicach poniżej 6,3 mm.

Wyniki te można uznać za zadowalające, niemniej uważa się za zbyt duży rozrzut FeO. Na wielkich piecach nr 3 i 5 zużywano speik wysokozasadowy wraz z grudkami poławskimi. W czasie prób piece pracowały bezawaryjnie, osiągały znacznie wyższą wydajność przy zmniejszonym zużyciu paliwa. Porównanie wskaźników bazowych to jest z roku 1992 ze wskaźnikami osiągniętymi w czasie prób przedstawiono w tabeli 1.

Na podstawie prezentowanych w tabeli 1 danych można stwierdzić, że prawie pod każdym względem nowa technologia jest lepsza od dotąd stosowanej.

Dla pełnego obrazu prób poniżej podano dodatkowe informacje a to:

- jednostkowa masa żuźla wynosiła średnio 350 kg/Mg sur,
- bogactwo wsadu 54,6% dla pieca nr 3 i 54,8 dla pieca nr 5,
- zużycie surowych topników ok. 4kg/Mg sur , czyli praktycznie były wyeliminowane,
- średni udział grudek wynosił 41% dla pieca nr 5 i 43% dla pieca nr 3.

Na podstawie badań emisji wykazano jej zmniejszenie w zakresie:

- CO o ok. 20%,
- pyłu o ok. 10%,
- SO₂ o ok. 22,5%,

co było głównie związane z obniżeniem zużycia paliwa, stosowaniem większej masy CaO i mniejszym udziałem pylastych rud i koncentratów w mieszance.

Powyższe należy obecnie 2008 r traktować jako przykład a nie aktualne dane liczbowe ściśle stosowane.

Analiza ekonomiczna natomiast wykazała, że jednostkowy koszt wsadu żelazodajnego i paliwa przy produkcji speiku wzrósł o 8 zł/Mg (1,9 dolara USA), głównie z powodu zakupów niskokrzemowej rudy brazylijskiej. Pomimo tego średni koszt jednostkowy produkcji surówki na obu piecach obniżył się o ok. 12,5 zł/Mg surówki. W skali roku dla byłej HTS oznacza to sumaryczny efekt 30mln zł.

Dzisiaj ze względu na szersze możliwości finansowe w Mitkalu efekty ekonomiczne, ekologiczne i jakościowe SA jeszcze większe. Niemniej myśl technologiczna z lat 90-tych pozostała ta sama, oczywiście z systematycznym doskonaleniem tej technologii.

Tabela 1. Porównanie wskaźników bazowych i otrzymanych w czasie próby.

L.p.	Parametr	Jednostka	Wskaźniki WP-3			Wskaźniki WP-5		
			Baza 1992	Próba	różnica	Baza 1992	Próba	różnica
1	Produkcja rzeźwiwiśta surówki	Mg/dobę	2417	2826	409	2502	3232	730
2	Produkcja skorogowana surówki	Mg/dobę	2417	2700	283	2502	2874	372
3	Zużycie koksu rzeźwiwiśte	kg/Mg sur-	587	551	-36	658	586	-72
4	Zużycie koksu skorogowane	kg/Mg sur-	587	580	-7	658	638	-20
5	Zawartość Si w surówce	%	1.02	0.69	-0.33	1.08	0.65	-0.43
6	Zawartość S w surówce	%	0.018	0.023	0.005	0.019	0.023	0.004
7	Zawartość Mn w surówce	%	0.65	0.57	-0.08	0.63	0.58	-0.05
8	KIPO	m ³ /Mg	0.711	0.610	-0.101	0.824	0.620	-0.204
9	Wydajność jednostkowa	Mg/m ³	1.406	1.639	0.233	1.213	1.613	0.400
10	Zasadowość żuzla	-	1.09	1.04	-0.05	1.10	1.05	-0.05

I.2. Najistotniejsze problemy światowego koksownictwa

Koksownictwo jako jedna z gałęzi przetwórstwa węgla pozostaje integralnie związana z hutnictwem żelaza i dlatego poziom produkcji koksu w skali światowej wyznaczają w praktyce: ilość surówki żelaza wytwarzanej w wielkich piecach oraz wskaźnik jednostkowego zużycia koksu potrzebnego do wyprodukowania 1 tony metalu. Choć znaczenie poziomu produkcji i zużycia stali jako miernika poziomu rozwoju cywilizacji uległo widocznemu ograniczeniu, pozostaje on jednak

w dalszym ciągu ważnym parametrem oceny standardu życia i stanu gospodarki. Światowa produkcja stali surowej i surówki w ostatnich pięciu latach kształtowała się na poziomie przekraczającym już miliard ton rocznie a surówki żelaza ponad 700 mln ton.

Z analizy danych wieloletnich wynika, że przy okresowych wahaniami w wielkości produkcji stali w dłuższym przedziale czasowym obserwuje się powolny przyrost lub skorygowanie tego wskaźnika. Stosunek produkcji surówki żelaza do stali ma w skali światowej od prawie 50 lat wartość zbliżoną do 0,7 pomimo znacznego rozwoju elektrometalurgii stali. Niewielki, można powiedzieć marginalny udział w wytwarzaniu stali mają procesy bezpośredniej redukcji rud żelaza z pominięciem wielkiego pieca. Wielki piec pozostanie podstawowym agregatem w linii produkcji stali. Istotnym zmianom, ważnym dla interesu koksownictwa, ulega natomiast poziom wskaźnika jednostkowego zużycia koksu w wielkim piecu co następuje w efekcie substytucji koksu pyłem węglowym (technologia PCI). Porównywanie cen i kosztów użytkowania obu paliw to jest koksu i węgla przy stosunku zamiany 1:1 wyraźnie przemawia na korzyść technologii PCI. Jedyną barierą ograniczającą stopień zamiany koksu węglem stanowią warunki gazodynamiczne niezbędne dla poprawnego funkcjonowania wielkiego pieca, w którym słup materiałów wsadowych powinien być w aktywnym kontakcie z przeciwwązowo poruszającym się gazem. Obecnie realne stało się osiągnięcie jednostkowego zużycia koksu na poziomie ok. 300 kg/t surówki, co potwierdzają dane pracy wielkich pieców. Pył węglowy wdmuchiwany do wielkiego pieca nie tylko ogranicza zużycie koksu, ale również wymusza poprawę jego jakości. Aby zrekompensować gorszą przewodność wsadu w wielkim piecu (szczególnie w strefie kohezyjnej) przy malejącym udziale koksu w namiarze, żąda się od niego wyjątkowo dobrych właściwości fizycznych i chemicznych. Wyprodukowanie koksu o takich cechach jakościowych wymaga z kolei zastosowania do jego wytworzenia najlepszych węgla ortokoksowych („hard”) o możliwie jak najmniejszej zawartości składników balastowych i szkodliwych w rodzaju popiołu, siarki, fosforu czy alkaliów. Rynek węgla koksowego w odróżnieniu od koksu jest rynkiem bardzo dużym 40% przypada na węgiel koksowy. Do największych eksporterów tego węgla należą takie kraje jak:

- Australia
- USA
- Kanada
- Polska
- RPA
- Rosja
- Chiny

Największymi importerami są natomiast: Japonia, Kraje Unii Europejskiej, Korea Płd.i Tajwan. Ceny węgla koksowych na rynkach światowych podlegają ciągłym fluktuacjom. Ceny CIF (w portach Ara) węgla koksowego („hard”) tzw. standardowego czyli zależą od zawartości: części lotnych $V^{daf} = 26\%$, wilgoci całkowitej $W_i^r = 8\%$, popiołu $A^d = 7,5\%$ i siarki całkowitej $S_i^d = 0,8\%$.

W podsumowaniu można stwierdzić, że na podstawie wielu sygnałów i analiz należy spodziewać się w rozpatrywanym okresie czasu na rynku światowym wystarczających ilości dobrych węgla koksowych o cenach zbliżonych do uzyskiwanych obecnie. Czynnikiem który w nieodległej przyszłości może limitować wielkość produkcji koksu jest stan techniczny bazy wytwórczej czyli podstawowych agregatów produkcyjnych koksowni, a w szczególności baterii koksowniczych. Znana i odczuwana jest w koksownictwie niechęć inwestorów do lokowania środków finansowych w te branżę przemysłu. Istnieją ku temu określone powody takie jak: wysokie nakłady na budowę nowych baterii szacowane na ok. 200 Euro na tonę koksu na rok, długi czas zwrotu poniesionych kosztów budowy, silne ograniczenia legislacyjne związane z ochroną środowiska naturalnego itp. Decyzje inwestycyjne są w efekcie odwołane, a główne agregaty starzeją się zmniejszając swe możliwości produkcyjne. Szacuje się, że za ok. 10 lat, przy tym tempie modernizacji koksowni ponad 60% baterii pracujących obecnie przekroczy wiek 25 lat, który do niedawna

dyskwalifikował je jako. obiekty produkcyjne. W zaistniałej sytuacji koksownie są zmuszone podejmować działania przedłużające żywot baterii nawet do 40 lat. Uzyskuje się to poprzez:

- zastosowanie nowoczesnych metod remontów gorących (torkretowanie pól suche i płomieniowe, spawanie ceramiczne) oraz nowych materiałów (np. kształtki zerorozszerzalnościowe),
- wprowadzenie nowoczesnych narzędzi umożliwiających dobrą kontrolę stanu technicznego baterii (endoskopy, laserowe mierniki stopnia deformacji ścian, zautomatyzowane systemy kontroli temperatur pozwalające na tworzenie map termicznych baterii),
- wdrażanie procedur kompleksowej oceny i monitorowanie stanu technicznego masywu ceramicznego, zbrojenia i osprzętu baterii,
- nieustanne szkolenie załogi i doskonalenie dyscypliny technologicznej.

Równolegle prowadzone są prace o charakterze innowacyjnym zmierzające do odejścia od koncepcji klasycznej koksowni. Główne i najbardziej obiecujące kierunki tych działań to:

- wielkokomorowy reaktor koksowniczy wyposażony w indywidualny system ogrzewania (Single Chamber System – SCS) rozwijany w ramach programu finansowanego przez kraje Unii Europejskiej,
- koksowania pracująca bez odzysku produktów węglowodnorodnych (Nonrecovery Coke Plant).

Reaktor SCS dzięki dużym wymiarom komory (do 150 m³) oraz indywidualnemu systemowi ogrzewania charakteryzuje się dużą wydajnością oraz elastycznością pracy, jest „przyjazny” dla środowiska oraz umożliwia produkcję koksu najwyższej jakości. Technologia procesu zakłada suche chłodzenie koksu i podgrzewanie wsadu węglowego np. Mittal, koksownia Przyjaźń. Rezygnacja z odzysku węglowodnorodnych będąca podstawą drugiego kierunku (Nonrecovery Coke Plant) stanowi niejako powrót do pierwotnej koncepcji procesu koksowania i ma w dzisiejszych warunkach głębokie uzasadnienie. Analiza dochodów ze sprzedaży produktów procesu klasycznego koksowania wykazuje bowiem, że koks którego średni uzysk z surowca węglowego można oszacować na ok. 75%, w wartości sprzedaży produktów koksowni na udział z reguły przekraczający 90%. Wpływy ze sprzedaży oczyszczonego gazu koksowniczego i produktów węglowodnorodnych stanowią więc niewielką część przychodów i w żadnej mierze nie pokrywają kosztów ich produkcji. Procesy oczyszczania gazu koksowniczego, obligatoryjne ze względów ekologicznych i technologicznych są więc balastem obciążającym koszty wytwarzania koksu. Koncepcje zaniechania aktualnie stosowanej technologii chłodzenia i oczyszczania gazu koksowniczego zmierzają w kierunku koksowni dwuproduktowej, w której produktem zasadniczym jest koks a ubocznymi alternatywnie:

- energia elektryczna wytworzona poprzez spalanie gazu w obrębie komory koksowniczej i układu grzewczego (piec koksowniczy typu Jewell-Thompson), odzyskanie ciepła spalin w kotle i produkcję pary kierowanej do turbogeneratora (spaliny po kotle mają być odsiarczane),
- gaz syntezowy złożony z CO i H₂, uzyskany z rozkładu surowego gazu koksowniczego.

Tabela 2.

Własność produkowanego koksu metalurgicznego i wymagań odbiorców zagranicznych.

Parametr jakościowy		jedn.	wartość żądana przez odb.zagranicznych	wartości uzyskiwane przez koksownie kraj.
Wytrzymałość	M40	%	80 - 86 (82 - 86)	78 - 82
Ścieralność	M10	%	5,5 - 7,0 (5 - 7)	6,0 - 7,0
Reakcyjność	CRI	%	26 - 28 (22 - 25)	28 - 30
Wytrzyma.po reakc.	CSR	%	-60 - 65 (65 - 70)	58 - 65
Zawartość popiołu	A	%	pon. 10,0 (8 - 9)	pon. 10,0
Zawartość siarki	S	%	pon. 0,7 (pon 0,5)	0,5 - 0,7
Zawartość fosforu	P	%	pon. 0,06 (pon. 00,2)	0,05 - 0,06
Zawartość alkaliów		%	0,2 -0,4 (pon.0,2)	0,3 - 0,45

I.2.1. Koks w wielkim piecu.

Koks jest jednym z podstawowych surowców procesu wielkopiecowego, a jego rolę w tym procesie rozpatrywać należy w trzech aspektach: energetycznym, chemicznym i fizycznym. Aspekt energetyczny polega na dostarczeniu do ww. procesu ciepła niezbędnego do nagrzania wsadu, stopienia metalu oraz przebiegu szeregu endotermicznych reakcji chemicznych. Wraz z koksem i jego substytutami dostarcza się ok. 80% potrzebnego w tym procesie ciepła – pozostała jego część wprowadzana jest do wielkiego pieca wraz z gorącym dmuchem. Zawarty w koksie i jego substytutach węgiel w ponad 60% zużywany jest na cele energetyczne, a w pozostałej części na cele redukcyjne.

Spalanie koksu w wielkim piecu przebiega w komorach spalania, które powstają przed dyszami wskutek dynamicznego działania strugi dmuchu. Odbywa się ono wokół powierzchni kawałków koksu, a jego szybkość limitowana jest przez dyfuzję w gazowej warstwie granicznej. Konsekwencją tego jest uzależnienie szybkości spalania koksu od wielkości kawałków; ze wzrostem ich stopnia rozdrobnienia wzrasta wielkość powierzchni przypadającej na jednostkę masy koksu, co w efekcie powoduje wzrost szybkości spalania.

Rozpatrując rolę chemiczną koksu, należy przypomnieć, iż podstawowym reduktorem w procesie wielkopiecowym jest tlenek węgla (CO). Jego głównym źródłem jest reakcja Boudouarda. CO₂ powstaje głównie w procesie spalania koksu i jego substytutów w dolnych partiach pieca.

W warunkach procesu wielkopiecowego występują trzy charakterystyczne obszary przebiegu reakcji Boudouarda:

1. obszar kinetyczny (poniżej 1000-1100°C) w którym zgazowanie przebiega głównie na wewnętrznej powierzchni kawałka koksu, a stężenie CO₂ jest praktycznie takie samo wewnątrz, jak i na jego zewnątrz. Szybkość zgazowania przyspieszają niektóre tlenki metali – m.in. Na₂O, K₂O, CaO. Tlenki alkaliczne obniżają progową temperaturę zgazowania koksu w wielkim piecu z 950°C do 750-850°C (w zależności od ilości tych tlenków i właściwości koksu).
2. Obszar dyfuzji wewnętrznej (od 1000-1100°C do 1350-1450°C), w którym szybkość zgazowania jest już na tyle duża, iż reagująca powierzchnia wewnętrzna koksu przestaje być w pełni wykorzystana z powodu nienadążania dyfuzji CO₂ w głąb porów koksu.
3. Obszar dyfuzji zewnętrznej (powyżej 1350-1450°C) w którym decydujący wpływ odgrywa szybkość dyfuzji cząsteczek CO₂ poprzez graniczną warstewkę CO otaczającą kawałek koksu. Ponieważ w rozpatrywanych temperaturach współczynnik dyfuzji w niewielkim tylko stopniu zmienia się z temperatura, dominujący wpływ na przebieg procesu zgazowania wywiera wielkość kawałków koksu. Zmniejszenie ich wymiarów powoduje wzrost zewnętrznej powierzchni przypadającej na jednostkę masy koksu, co skutkuje zwiększeniem szybkości zgazowania w tym obszarze.

Koks odpowiedzialny jest także za nawęglanie metalu. Poniżej temperatury topienia żelaza w procesie tym uczestniczy węgiel – sadza, który powstaje w wyniku rozkładu zawartego w gazie CO,

a po roztopieniu żelaza odbywa się także za pomocą węgla zawartego w koksie. Końcowe nawęglanie przebiega poniżej poziomu dysz wskutek rozpuszczania się w ciekłym żelazie zawartego w koksie węgla. Intensywność tego procesu zależy m.in. od warunków styczności i powierzchni kontaktu stopionego metalu z koksem. Węgiel koksu uczestniczy także w reakcjach zachodzących w fazach ciekłych metal-żużel (reakcja tlenków żelaza z fazy żużlowej, która przebiega podczas ściekania żużli pierwotnych pomiędzy kawałkami koksu) oraz w redukcji innych tlenków (krzemu, manganu, fosforu, chromu, wanadu, arsenu itd.).

Fizyczna rola koksu sprowadza się do zapewnienia gazom odpowiedniej przewodności złoża materiałów wsadowych w poszczególnych partiach wielkiego pieca, zapewnia przepuszczalności wsadu umożliwiającej spływ ciekłego metalu i żużla w dolnych partiach pieca, a także podtrzymywania słupa materiałów wsadowych strefie gdzie pozostałe materiały wsadowe ulegają stopieniu. Do zabezpieczenia wymaganej przewodności wsadu w górnej części pieca wymagany jest koks o uziarnieniu zbliżonym do uziarnienia pozostałych składników wsadu, co gwarantuje odpowiednią porowatość złoża materiałów wsadowych w tej części pieca. W dolnej części pieca, gdzie koks pozostaje jedynym składnikiem wsadu w stanie stałym, winien on zachować dostatecznie duże wymiary, aby umożliwić spływanie ciekłego metalu i żużla do garu oraz swobodny ruch gazów w górę pieca. Przepuszczalność wsadu w dolnych partiach pieca ma też ważne znaczenie dla zachowania się alkaliów w wielkim piecu. Z uwagi na niższą temperaturę w tej części pieca niż w komorze spalania, występuje tu zjawisko kondensacji alkaliów na powierzchni koksu i żużla. Alkalia zgromadzone w żużlu są wraz z nim usuwane z pieca, natomiast alkalia skondensowane na powierzchni koksu ulegają ponownemu odparowaniu wskutek późniejszego wzrostu temperatury. Z tego względu niska przepuszczalność wsadu w tej części pieca intensyfikuje cyrkulację alkaliów. Na przewodność wsadu w całym piecu, jak też przepuszczalność ciekłych materiałów w dolnych jego partiach decydujący wpływ wywiera zjawisko degradacji ziarnowej koksu, które w warunkach wielkiego pieca powodowane jest przez trzy grupy czynników:

1. oddziaływania chemiczne,
2. oddziaływania mechaniczne,
3. oddziaływania termiczne.

W procesie wielkopieczowym stopień zgazowania koksu na poszczególnych jego etapach utrzymuje się na podobnym poziomie, niezależnie od jego reaktywności. Jest to wynikiem kontroli operacyjnej, zapewniającej stabilne warunki temperaturowe procesu. Zróżnicowana reaktywność koksu wywiera natomiast istotny wpływ na zmiany jego wytrzymałości i związane z tym zjawisko degradacji ziarnowej.

Kolejne oddziaływanie chemiczne wywierane na koks w wielkim piecu związane jest ze związkami alkalicznymi. W strefie cyrkulacji alkaliów reagują one z koksem tworząc związki kompleksowe charakteryzujące się dużą objętością cząstkową. W wyniku przemieszczenia się koksu do strefy najwyższych temperatur związki te ulegają odparowaniu, co powoduje osłabienie (spulchnienie) jego struktury. Rozmiar tego zjawiska, zależy m.in. od ładunku oraz rodzaju cyrkulujących alkaliów, a także porowatości koksu w tej strefie, decyduje o stopniu pogorszenia wytrzymałości koksu a w konsekwencji – o wielkości jego degradacji ziarnowej.

Do oddziaływań chemicznych wpływających na proces degradacji ziarnowej koksu należy zaliczyć też:

- procesy nawęglania surówki i redukcji żużla prowadzące do zmian strukturalnych koksu w dolnych partiach pieca,
- katalityczne działanie żelaza metalicznego,
- działanie stopionego metalu na powierzchnię koksu.

Pierwsze oddziaływania mechaniczne na koks występują już podczas jego załadunku do wielkiego [pieca. Powodują rozkruszanie koksu przebiegające wzdłuż istniejących w jego kawałkach szczelin i pęknięć. Od ich ilości i wielkości zależy odporność koksu na rozkruszanie, a zjawisko to można istotnie ograniczyć poprzez stosowanie wcześniejszej stabilizacji mechanicznej koksu. W tzw. suchych strefach pieca koks podlega dalszej degradacji ziarnowej polegającej głównie na ścieraniu jego naroży oraz, w mniejszym stopniu, kruszeniu pod wpływem sił ściskających. Ścieranie koksu

spowodowane jest jego przemieszczaniem się wraz ze wsadem w dół pieca, a także, choć w znacznie mniejszym stopniu, również w kierunku poziomym. Ponadto z uwagi na różnice masy kawałków koksu i rudy, te ostatnie przemieszczają się szybciej niż koks, co powoduje dodatkowe ścieranie koksu. Wszystkie te oddziaływania ścierające, jak też wspomniane już wcześniej kruszenie się koksu są szczególnie silne w dolnych partiach pieca, gdzie masa słupa wsadu jest już bardzo duża. Najsilniejsze oddziaływania mechaniczne występują jednak w komorze spalania, gdzie wskutek wysokiej energii kinetycznej dmuchu wirujące z dużą szybkością kawałki koksu ulegają intensywnemu rozkruszaniu i ścieraniu.

Oddziaływania termiczne na koks występują głównie w komorze spalania i związane są z szokiem termicznym, na jaki w tym miejscu narażony jest koks. Do tych oddziaływań zaliczyć należy też pewne porządkowe struktury chemicznej koksu, jakie ma miejsce w tych partiach wielkiego pieca, w których temperatury przekraczają końcową temperaturę koksovania (ok. 1000°C). Następuje dzięki niemu niewielka poprawa wytrzymałości koksu głównie wskutek wzrostu jego wytrzymałości strukturalnej. Wspomnieć też należy o wysokotemperaturowych zmianach składu i morfologii substancji mineralnej koksu (topienie, odparowanie, redukcja węglem itp.).

Wskutek stosowania substytutów (pył węglowy, gaz, paliwa ciekłe) jednostkowe zużycie koksu w procesie wielkopiecowym spadło do wartości nie przekraczających 300 kg na tonę surówki. Było to możliwe dzięki przejściu przez te substraty części energetycznej i chemicznej roli koksu. Równocześnie jednak istotnie wzrosło znaczenie fizycznej roli koksu a tym samym zaostriły się wymagania dotyczące jego wytrzymałości w warunkach panujących w wielkim piecu.

Charakteryzująca się dużym zróżnicowaniem wymiarów porów struktura koksu wywiera istotny wpływ na wypełnianie przez niego każdej z trzech omówionych wcześniej ról w procesie wielkopiecowym. W sposób bezpośredni wpływa na przebieg zgazowania koksu przez CO₂, zwłaszcza w jej obszarze kinetycznym, a także w obszarze, w którym czynnikiem limitującym jest zjawisko dyfuzji wewnętrznej. Według... kolejność poszczególnych czynników pod względem intensywności ich oddziaływania na przebieg zgazowania koksu przedstawia się następująco: Katalityczne oddziaływanie tlenków alkalicznych > porowatość > zawartość wodoru w koksie
Wytrzymałość koksu zależna jest od:

- ilości (objętości) stałego materiału przenoszącego występujące w nim naprężenia, która zależna jest od porowatości koksu związanej z występującymi w nim porami grubymi,
- wytrzymałości stałego materiału (matrycy koksowej), która determinowana jest występującymi w niej defektami (porami i pęknięciami) o wymiarach rzędu mikrometra.

W ostatnim okresie, spośród całego szeregu testów oceny własności mechanicznych koksu (próby bębnowe, próby zrzutowe itp.) największe znaczenie przypisuje się wynikom testu Ippon Steel Co, a konkretnie wyznaczanemu w jego ramach wskaźnikowi CSR (Coke Strength after Reaction). Uwzględnia on bowiem wpływ występujących w wielkim piecu oddziaływań chemicznych i termicznych. Praktyczną przydatność wskaźnika CSR do oceny zachowania się koksu w wielkim piecu, jak też przebiegu samego procesu potwierdziły wyniki szeregu badań przemysłowych. Wykazały one wpływ wskaźnika CSR m.in. na: proces degradacji ziarnowej koksu w wielkim piecu, dopuszczalny poziom substytucji koksu pyłem węglowym, zużycie koksu w procesie, przewodność i przepuszczalność wsadu szczególnie w przypadku dużych jednostek produkcyjnych, rozkład stref reakcyjnych wewnątrz pieca, wydajność procesu, stabilność spływu żużla i ciekłego metalu w dolnych partiach pieca, stopień nawęglenia surówki, temperaturę ciekłego metalu oraz żywotność wyłożenia wielkiego pieca w jego dolnych partiach.

Z kolei wyniki innych badań potwierdzają występowanie silnej zależności wskaźnika CSR zarówno od charakteru porowatej struktury koksu, jak i jego reaktywności.

II. Paliwa zastępcze - teraz i w przyszłości.

Paliwa zastępcze nazwę swoją biorą stąd, że zastępują częściowo koks jako podstawowe paliwo w wielkim piecu. W przedmiocie „Technologia i Podstawy Sterowania Procesami Redukcji” omówiono dość szeroko jakie stosuje się paliwa zastępcze, co dotyczy: gazu ziemnego, mazutu, smoły pogazowej, gazu koksowniczego i pyłu węglowego. Oprócz pyłu węglowego wdmuchiwanego do wielkiego pieca rolę technologiczną, cieplną i chemiczną ww. paliw omówiono szczegółowo w wykładach z III roku. Urządzenia do wdmuchiwania pyłu węglowego również zostały omówione szczegółowo natomiast mało powiedziano o techniczno-technologicznych aspektach aspektach wdmuchiwania pyłu węglowego jako paliwa zastępczego obecnie najbardziej wykorzystywanego w większości hut światowych. W przyszłości również pył węglowy będzie wykorzystywany ale przewiduje się jego izekcję w połączeniu z elementami rudnymi, zmielonymi tworzywami sztucznymi, topnikami i mieszaninami komponentów. Można przewidywać, że nastąpi duży postęp w utylizacji tworzyw sztucznych przez wdmuchiwanie ich do wielkiego pieca samodzielnie lub w połączeniu z czynnikami dzisiaj jeszcze nieokreślonymi, bowiem podejmowane próby są bardzo zachęcające ze względów ekonomicznych i proekologicznych. Obecnie również bez przerobu rozpoczęto wdmuchiwanie ropy naftowej ale ceny jej aktualne nie zachęcają do rozwijania tej technologii. Stąd aktualnie w następnym podrozdziale omówiono technologiczno-techniczne-ekonomiczne aspekty wdmuchiwania pyłu węglowego do wielkiego pieca.

Najważniejsze argumenty przemawiające za wdmuchiowaniem węgla (lub gazu ziemnego) do pieca hutniczego, to:

- oszczędność kosztów przez niższe zużycie koksu. Koszt koksu jest znacznie wyższy niż węgla, ponadto, użycie wtryskiwacza pozwala na zużycie wyższych temperatur dmuchu, co również prowadzi do niższego zużycia koksu,
- zwiększona produkcja przez używanie dmuchu wzbogaconego tlenem.

Powodem widocznej wszechstronności wielkiego pieca do pobierania wszystkich typów materiałów zawierających pierwiastek węgiel jest to, że przy dyszach temperatury płomienia są tak wysokie, że wszystkie wdmuchane materiały SA przekształcone do prostych molekuł jak H_2 i CO i poza strefą piec „nie wie” jaki typ paliwa był wtryskiwany.

II.1. Wdmuchiwanie węgla (PCI): sprzęt.

Podstawowa konstrukcja dla urządzeń wdmuchiwania węgla wymaga następujących funkcji do spełnienia:

- Mielenie węgla. Węgiel musi być zmielony do bardzo małych rozmiarów. Najpowszechniej używanym jest pył węglowy: około 60% węgla ma poniżej 75 um. Ziarnisty węgiel jest raczej grubszy z rozmiarami 1 do 2 mm.
- Suszenie węgla. Węgiel zawiera znaczne ilości wilgoci, 8% do ponad 10%, Ponieważ wdmuchiwanie wilgoci zwiększa szybkość redukcji, wilgoć powinna być usunięta w tak dużym stopniu jak to możliwe.
- Transport węgla przez rurociągi. Jeśli węgiel jest za mały, transport pneumatyczny będzie zahamowany. To może skutkować formowaniem się mniejszych łusek na ścianach i też może prowadzić do wycieku węgla z rur transportowych.
- Wdmuchiwanie pyłu węglowego: węgiel musi być wdmuchany w równych ilościach przez wszystkie dysze. Szczególnie przy niskim zużyciu koksu i wysokiej produktywności symetria obwodowa wdmuchiwania powinna być utrzymana.

Są różni dostawcy osiągalni do urządzeń wdmuchiwania pyłu węglowego, które podejmują funkcje wspomniane wyżej w specyficzny sposób. Niezawodność sprzętu jest najwyższej wagi, skoro wielki piec musi być zatrzymany w ciągu 1 godziny, jeśli wdmuchiwanie węgla kończy się. W materiałach dla I stopnia (III r) studiów urządzenie do wdmuchiwania różnych firm i systemach omówiono szczegółowo.

II.1.1. Specyfikacja węgla dla PCI.

Typy węgla są rozróżniane wg ich zawartości substancji lotnej. Substancja lotna jest zdeterminowana przez ważenie węgla przed i po podgrzewaniu przez trzy minuty w 900°C. Węgłe, które mają pomiędzy 6 a 12% substancji lotnej SA klasyfikowane jako węgle o niskiej zawartości części lotnych. Wszystkie typy węgla były pomyślnie użyte.

Najważniejsze właściwości wdmuchiwanego węgla to;

- Wysoki stopień wymiany koksu. Skład węgla i jego zawartość wilgoci determinują ilość koksu zastąpionego przez określony typ węgla. Prosta formuła dla stopnia wymiany (w porównaniu z koksem o zawartości 87,5% pierwiastka węgla To:
 $RR=2xC(\text{węgiel})+2,5xH\%(\text{węgiel})-2x\text{wilgoć}\%(\text{węgiel})-86+0,9x\text{popiół}\%(\text{węgiel})$.
- Skład: wysoka siarka i wysoki fosfor są prawdopodobne, aby zwiększyć koszty stalowni. Te składniki powinny być oszacowane przed zakupem określonego typu węgla. O młodych węglach (o dużej zawartości tlenu) wiadomo, że są bardziej podatne na samoogrzewanie i zapalenie w atmosferach zawierających tlen. To jest także ważny czynnik, który musi być rozważony ze względu na ograniczenia w systemie przeładunku zmielonego węgla.
- Substancje lotne: węgle o wysokiej zawartości części lotnych są łatwo gazyfikowane w strefie wirowania, ale mają niższy stopień wymiany w procesie.
- Twardość. Twardość węgla, charakteryzowany przez Wskaźnik Zdolności Przemiałowej Hardgrove (HGI) musi odpowiadać specyfikacjom sprzętu mielącego. Wynikający rozmiar zmielonego węgla jest bardzo zależny od tego parametru i musi odpowiadać ograniczeniom obsługi węgla i systemu wdmuchiwanego.
- Zawartość wilgoci. Zawartość wilgoci surowego węgla jak również wilgoć powierzchni zmielonego węgla musi być brany pod uwagę. Wilgoć powierzchni w zmielonym koksie będzie prowadzić do problemów z przywieraniem i problemów w przeładunku.

Potencjalnie wdmuchiwane węgle mogą być oceniane na podstawie metody oszacowania gdzie wszystkie efekty w kosztach SA brane pod uwagę. Często jest możliwe użycie dwóch lub trzech typów wdmuchiwanego węgla, tak że niesprzyjające właściwości mogą być rozcieńczone.

II.1.2. Kontrola procesu z wdmuchiwanym pyłem węglowym.

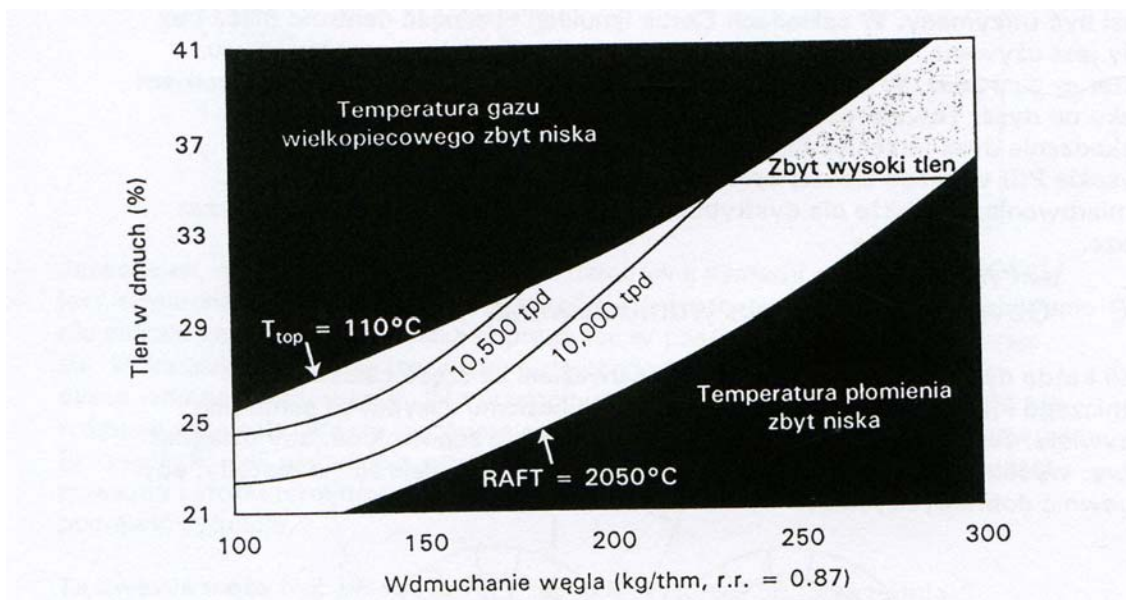
Przy wysokich operacjach wdmuchiwanego pyłu węglowego około 40% reduktorów jest wdmuchiwanego przez dysze. Dlatego, jest ważne, aby kontrolować ilość węgla na tonę surowki tak dokładnie jak zużycie koksu jest kontrolowane. Zbiorniki zasilające wdmuchiwanego węgla są ważne nieustannie i natężenie przepływu węgla jest kontrolowane.

Aby skalkulować odpowiednie natężenie przepływu węgla (w kg/minutę) produkcja surowki musi być znana. Jest kilka sposobów, aby skalkulować produkcję. Wielkość produkcji może być wyprowadzona z ilości materiału załadowanego do pieca. Krótkoterminowe poprawki mogą być wykonane przez kalkulowanie zużycia tlenu na tonę surowki z parametrów dmuchu w stabilnym okresie i wtedy kalkulowanie rzeczywistej produkcji z danych dmuchu. Błędy systematyczne i/lub wymaganie dodatkowego węgla może być wprowadzone do modelu kontroli.

Techniczne sposoby wdmuchiwanego węgla przez dysze jak i konstrukcje lanc zostały omówione w wykładzie na III r studiów, gdzie również oceniano ich efektywność.

Temperatura płomienia jest sama w sobie zdeterminowana przez ilość węgla, typ węgla, temperaturę dmuchu, wilgoć dmuchu i wzbogacenie tlenu. Procent tlenu w dmuchu może być użyty do balansowania zapotrzebowań cieplnych wyższego i niższego pieca. Balans jest zależny od miejscowej sytuacji. To zależy np. od jakości wsadu i koksu oraz użytego typu węgla. Dla balansu istnieją pewne techniczne i technologiczne ograniczenia, które są przedstawione jako przykład na rysunku 1. Dla wyższych wielkości wdmuchiwanego wymagane jest więcej tlenu. Ograniczenia są dane przez:

- Zbyt niską temperaturę gazu wielkopiecowego. Jeśli temperatura gazu wielkopiecowego staje się zbyt niska, to zabiera zbyt długo dla wsadu, aby wyschnąć i wysoka skuteczność pieca hutniczego skraca się.
- Zbyt wysoka temperatura płomienia. Jeśli temperatura płomienia staje się zbyt wysoka, opadanie wsadu może się stać nieregularne.
- Zbyt niską temperaturę płomienia. Niska temperatura płomienia będzie hamować gazyfikację węgla i topienia rudy wsadu.
- Techniczne ograniczenia dla dozwolonego lub dostępnego wzbogacenia tlenu.



Rys.1. Czynniki ograniczające, wpływające na warunki strefy wirowania z wdmuchiwaniami sproszkowanego węgla (RAFT = adiabatyczna temperatura płomienia w strefie wirowania).

Należy szczególnie zannotować efekt użycia dodatkowego wdmuchiwaniami węgla dla regeneracji chłodzonego pieca. Przez dodanie dodatkowego węgla do pieca, wielkość produkcji zmniejsza się o około 2,5% dla każdego 10 kg dodatkowego węgla na tonę surówki. Jednocześnie, temperatura płomienia spada o około 32°C. Dlatego, zależnie od specyficznej sytuacji, zdolność topienia na tonę surówki może się nawet zmniejszyć. Jeśli temperatura spada od 2,050 do 2,018°C, zdolność topienia zmniejsza się o 5% (32/2,050-1,400) i produkcja zmniejsza się o 2,5% skutkując w zmniejszeniu się ciepła topnienia na tonę surówki o 2,5%. Jeśli ochłodzony piec ma niewystarczającą zdolność topienia gazu, dodatkowy PCI może pogorszyć sytuację. W takiej sytuacji skuteczność procesu musi być poprawiona, tj. przez niższą wielkość produkcji i niższą ilość dmuchu.

II.2. Kontrola przepływu gazu.

Dla zoptymalizowanego procesu wielkopiecowego, kontrola wewnętrzna przepływu gazu w wielkim piecu jest o krytycznym znaczeniu. Ogólnie mówiąc, zostało odkryte że bilans pomiędzy przepływem centralnego gazu a przepływem gazu ścianowego musi być utrzymany. W zakładach Corus Ijmuiden obecność centrum pieca bez rudy jest używana, aby dystrybuować gaz spadkowy przez szczeliny koksu. W konsekwencji rdzeń strefy topienia może opadać całkiem blisko od dysz (przeciek lub przechylenie).

Wysokie PCI wymaga lepszej symetrii obwodowej procesu, nie tylko dla zamiarowania, ale także dla dystrybucji dmuchu i wdmuchiwaniami węgla przez dysze.

Z powyższego widać jak trudno jest ocenić optymalne wdmuchiwanie masy pyłu węglowego do wielkiego pieca w połączeniu z ww. czynnikami określającymi takie „możliwości”.

Jedynym jest dzisiaj pewne to fakt, że nie jest możliwe zmniejszenie zużycia koksu w wielkim piecu poniżej 300 kg/t surówki. Spowodowałoby (i w badaniach oraz praktyce powodowało) to brak tzw. „rusztu koksowego” (za wąskich okien koksowych w strefie kohezji) koniecznego do przepływu gazów garowo-spadkowych do strefy suchej wielkiego pieca. Już wynika z doświadczeń wielu hut, że taki przypadek to zła praca z zawisaniem i samozarywaniem wsadu i wynikająca stąd mała produktywność czyli dużo większymi kosztami produkcji. O tym musi pamiętać każdy technolog i ekonomista w hucie.

III. Awaryjny przebieg procesu wielkopiecowego.

Rozdział ten jest poświęcony awaryjnym przebiegom technologicznym a nie wynikającymi awariami związanymi z uszkodzeniami mechanizmów wielkiego pieca i urządzeń mu towarzyszących. Należy również nadmienić, że już poświęcono na I stopniu studiów (III r) dużą uwagę przy omawianiu tzw. pierwiastków szkodliwych w procesie tj. cynku i alkaliów powodujących również awaryjne przebiegi technologiczne procesu wielkopiecowego oraz awarie mechaniczne (narosty obmurza i zarastanie garu i dysz).

Obecnie za awaryjne stany związane głównie z technologią prowadzoną na piecu uważa się:

- centralny i obrzeżny bieg pieca (przepływ gazów),
- zawisanie wsadu w piecu,
- kominowy przepływ gazów w piecu,
- zarywkowy bieg pieca,
- zamrożenie garu wielkiego pieca.

Często ww. stany awaryjne wiążą się z czynnikami i zjawiskami konstrukcyjno-technicznymi jak: palenie się dysz, uszkodzeniu urządzenia zasypowego, narosty szybowe i garowe (omówiono na I stopniu studiów) ale nie są one przedmiotem tak częstych stanów wynikających z przesłanek technologicznych. Poniżej omówiono w miarę szczegółowo stany przebiegów awaryjnych procesu wielkopiecowego.

III.1. Zaburzenia i awarie w procesie wielkopiecowym.

Podstawowym warunkiem uniknięcia poważnych strat produkcyjnych przy nienormalnym biegu pieca jest wczesne rozpoznanie nienormalnego biegu oraz niezwłoczne przeciwdziałanie.

III.1.1 Nadmiernie gorący bieg wielkiego pieca.

- A. Przyczyną powstawania jest zmniejszenie zużycia ciepła w porównaniu z jego przychodem. Może to być spowodowane zmianą jakości wsadu, lepszym rozdziałem gazów w wielkim piecu i w związku z tym lepszym wykorzystaniem ich energii cieplnej i chemicznej, obniżeniem obciążenia R:K na skutek nadważania koksu lub rudy, podwyższeniem faktycznej wilgotności dmuchu na skutek rozregulowania aparatury.
- B. Rozpoznanie.
 - a. ciśnienie gorącego dmuchu stopniowo się podwyższa.
 - b. Rozrzut punktów temperatury gazu gardzielowego staje się wyższy.
 - c. Diagram schodzenia sond wskazuje na nierówny bieg pieca (poziome odcinki wykresu sond lub gwałtowne zarywnie wsadu)
 - d. Dysze pracują bardzo gorąco, żużel staje się nadmiernie gorący i bardziej zasadowy, wzrasta zawartość krzemu w surówce.
 - e. Zmniejsza się intensywność biegu pieca.
- C. Przeciwdziałanie.
 - a. Przy chwilowym nadmiernym podgrzaniu się pieca należy podwyższyć wilgotność dmuchu, a w bardzo ostrym przypadku obniżyć temperaturę dmuchu.

- b. Jeżeli zaistniały warunki dłuższego lub trwałego podgrzania się pieca należy zwiększyć obciążenie R:K.
- c. Jeżeli podgrzanie pieca jest spowodowane nieprawidłowym ważeniem wsadu lub rozregulowaną aparaturą pomiaru i regulacji temperatury i wilgotności, należy te przyczyny niezwłocznie usunąć, a chwilowo działać jak w punkcie a.

III.1.2. Chłodny bieg wielkiego pieca.

- A. Zimny bieg wielkiego pieca mogą wywołać te same przyczyny jak w punkcie 43, a działające w przeciwnym kierunku. Poza tym może go wywołać dłuższe stosowanie nieprawidłowego systemu zasypu powodującego niewłaściwy rozdział strumienia gazów w wielkim piecu, przedostawanie się większych ilości wody do pieca z uszkodzonych elementów chłodzenia pieca.
- B. Rozpoznanie.
 - a. Stopniowy spadek ciśnienia gorącego dmuchu z równoczesnym wzrostem ilości.
 - b. Intensywność biegu pieca zwiększa się nieproporcjonalnie do wzrostu ilości dmuchu.
 - c. Rozrzut punktów temperatury gardzieli zawęża się.
 - d. Temperatura gazów gardzielowych spada.
 - e. Temperatura gazów peryferyjnych w większości wypadków spada i zwiększa się różnica pomiędzy wskazaniami poszczególnych termopar.
 - f. Żużel staje się chłodniejszy aż do czarnego żelazistego, jego zasadowość spada, a w surówce obniża się zawartość krzemu z równoczesnym wzrostem zawartości siarki.
 - g. Dysze pracują intensywnie, ale chłodno (ciemniej) w polu widzenia może pojawiać się żużel i „nieprzygotowane” kawałki materiałów wsadowych (czarne).
- C. Przeciwdziałanie.

Ochłodzenie biegu wielkiego pieca jest jednym z najniebezpieczniejszych odchyłeń od normalnego biegu i dla uniknięcia poważniejszych skutków wymaga poważniejszego przeciwdziałania.

- a. Należy zmniejszyć obciążenie R:K.
- b. Stopniowo obniżać wilgotność dmuchu.
- c. Stopniowo (b. ostrożnie) podnosić temperaturę, tak by nie spowodować zawisania wsadu.
- d. Zmniejszyć stopień przeładowania peryferii pieca rudą.
- e. Ładować dodatkowe porcje koksu.
- f. Zmniejszyć intensywność biegu pieca przez obniżenie spadku ciśnienia i ilości dmuchu.
- g. Jeżeli pojawiają się oznaki opornego biegu pieca i grozi zawieszeniem wsadu należy obniżyć temperaturę dmuchu z równoczesnym obniżeniem wilgotności i obserwować pracę dysz. Jeżeli żużel zalewa dysze należy temperaturę podnieść.
- h. Normalne parametry ciśnienia, ilość temperatury i wilgotności ustala się ponownie po całkowitym zlikwidowaniu ochłodzenia i uzyskania równego biegu pieca.

III.1.3. Nadmiernie obrzeżny bieg pieca.

- A. **Zjawisko to powstaje w wypadkach.**
 - a. Nadmiernego „rozluźnienia” obrzeży pieca przy nieodpowiednim systemie zasypu.
 - b. Niedostatecznej ilości dmuchu.
 - c. „Przeładowania” garu pieca grafitem, miałem koksowym, żużlem i surówką stanie ciastowatym przy małej ilości dmuchu.
 - d. Spadku temperatury dmuchu.
- B. **Rozpoznanie.**
 - a. w początkowej fazie spada ciśnienie gorącego dmuchu (ilość i temperatura niezmiennione). Gdy następnie osiowa część pieca staje się coraz mniej przewiewna

w wyniku nadmiernego rozwoju obrzeżnego ciśnienia dmuchu wzrasta, a ilość maleje.

- b. Wzrasta średnia temperatura gardzieli, a rozrzut punktów na diagramie temperatury gardzieli staje się nadmiernie szeroki.
- c. Na diagramie sond pojawiają się oznaki nierównego schodzenia wsadu.
- d. Spada zawartość CO₂ w gazach peryferyjnych o 2-3%, a nieznacznie wzrasta CO₂ w odległości 1,5-3m od ściany pieca.
- e. W początkowym okresie stan dysz jest normalny. Surówka i żużel SA normalne ale pojawiają się spusty z zawyżoną zawartością siarki. Następnie osiowa część pieca coraz gorzej pracuje, występują oznaki ochłodzenia pieca oraz zjawisko częstego palenia się dysz.

C. Przeciwdziałanie.

- a. Zmiana systemu załadunku, a jeżeli nie wywołuje to dostatecznego rezultatu to należy zmieniać poziom zasypu i wielkość naboju.
- b. Jeżeli następuje „przeładowanie” garu należy podwyższyć płynność żużla i surówki przez dodatek rudy manganowej do naboju i podniesienie zawartości manganu w surówce.

III.1.4. Przeładowanie obrzeży pieca rudą.

A. Przyczyny.

Zjawisko to powstaje w rezultacie dłuższej pracy pieca przy dużej zmienności sitowej analizy składników wsadu.

Pracę pieca charakteryzuje nierówny bieg ze skłonnością do zawieszania wsadu.

A. Rozpoznanie.

- a. wzrost ciśnienia gorącego dmuchu przy niezmięionej ilości i temperaturze.
- b. diagram ciśnienia gorącego dmuchu wykazuje coraz częstsze wahania.
- c. diagram temperatury gardzieli przyjmuje kształt wąskiego paska (mały rozrzut punktów) a średnia temperatura spada o 20-30°C.
- d. spada temperatura wskazywana przez termopary pod płytami ochronnymi.
- e. diagram sond wskazuje na nierówne schodzenie wsadu w w. piecu.
- f. na wykresie zawartości CO₂ w gazie wzdłuż średnicy szybu występuje wzrost do 10-12% CO₂ przy ścianach i spadek zawartości CO₂ w osi pieca.

B. Przeciwdziałanie.

- a. Należy rozluźnić słup materiałów wsadowych przy ścianach pieca.
- b. Jeżeli zmiana systemu zasypu jest mało skuteczna, należy zmienić wielkość naboju (powiększyć wielkość naboju z odpowiednimi zmianami poziomu zasypu).
- c. Działanie prowadzić ostrożnie, aby nie spowodować zahamowania pracy w osi pieca. Zmiany należy przeprowadzać stopniowo, początkowo na krótkie okresy. Przy zbyt gwałtownym likwidowaniu nadmiernie osiowego biegu pieca można bardzo łatwo doprowadzić do zawieszania wsadu.
- d. Przy likwidacji osiowego biegu pieca, może nastąpić przeładowanie garu wraz z zachodzeniem. Dlatego należy to zjawisko uprzedzić przez obniżenie obciążenia R:K.

III.1.5. Kanałowy bieg wielkiego pieca powstaje w pewnej ograniczonej części pieca gdy następuje, w porównaniu z resztą a rozluźnienie słupa materiałów wsadowych.

A. Podstawowymi przyczynami wywołującymi powstawanie kanałowego biegu pieca są:

- a. wzrost zawartości mialu we wsadzie rudnym,
- b. zbyt intensywny bieg pieca zwłaszcza przy stosowaniu dużego spadku ciśnienia w. pieca,

- c. praca na gęstych i chłodnych żużlach,
- d. nierówny rozdział dmuchu lub mazutu w dysze
- e. dłuższy okres pracy na przeładowanej osiowej a w szczególności peryferyjnej części pieca
- f. nierównomierne zużycie obmurza szybu względnie nieprawidłowa praca aparatu zasypowego
- g. zmiana profilu w związku z powstałymi narostami.

B. Rozpoznanie.

- a. stosunkowo duże wahania ciśnienia gorącego dmuchu,
- b. diagram temperatur gardzieli nie przedstawia punktów rozrzuconych w pewnym pasie lecz punktu odpowiadające temperaturom w poszczególnych przewodach gazowych formują oddzielne linie. Termopary o wyższej temperaturze wskazują na lokalizację kanału
- c. wyraźny wzrost temperatury na jednej lub kilku nad sobą położonych termopar w obmurzu szybu. Te termopary wskazują równocześnie lokalizację kanału,
- d. diagram pracy sond wykazuje silne zarywanie wsadu, zwłaszcza jeśli kanał powstał w pobliżu osi sond,
- e. krzywa zawartości CO₂ wzdłuż średnicy szybu wykazuje silny spadek ilości CO₂ w gazie w rejonie kanału, zwłaszcza jeśli objęty on jest strefą poboru prób gazu,
- f. wzrasta zawartość siarki w surówce,
- g. dysze w osi kanału pracują intensywniej, ciemnieją i pojawiają się w nich, nieprzygotowane kawałki materiałów wsadowych.

C. Przeciwdziałanie.

- a. likwidację kanału należy prowadzić dwoma zasadniczymi metodami: załadunkiem jak największej ilości rudy w miejscu powstałego kanału, względnie załadunek koksu w rejony poza kanałem
- b. kanały tworzą się najczęściej w obrzeżnej części pieca, dlatego najlepiej doprowadzić do tego by piec pracował intensywnie na całym obwodzie,
- c. zasadniczym warunkiem skuteczności wszelkich środków zmierzających do likwidacji kanałowego biegu, jest usunięcie przyczyn powstawania kanału,
- d. załadunek wybranych stref pieca odpowiednimi materiałami (rudą , koksem) prowadzić przez ustawienie rynn zsypanych aparatu zasypowego,
- e. usunięcie kanału powstałego na skutek lokalnego jednostronnego zużycia wymurówki lub innych podobnych defektów jest niemożliwe, należy więc likwidować przez zmniejszenie średnicy dysz pracujących w rejonie kanału
- f. częściowe lub całkowite zaślepienie niektórych dysz
- g. należy pamiętać że dłuższe prowadzenie pieca na biegu kanałowym powoduje podwyższenie zużycia koksu na skutek złego wykorzystania energii cieplnej gazów. Jeżeli podjęte środki dla zlikwidowania kanału dają rezultaty, wykorzystanie gazów poprawi się i piec zacznie się podgrzewać. Należy więc równocześnie w odpowiednim momencie podnosić obciążenie, aby nie dopuścić do powstania gorącego biegu.

III.1.6. Przeładowanie osiowej części pieca rudą.

A. Zjawisko to powstaje najczęściej na skutek prowadzenia pieca na zbyt wysokim poziomie zasypu przy równoczesnym ustawieniu niewłaściwego systemu zasypu. Przeładowanie osi pieca rudą, charakteryzuje nierówny bieg pieca, oporny bieg z podwieszaniem wsadu, zarywkowy bieg, zwiększony wydmuch pyłu. Dłuższy czas trwania tego stanu sprzyja powstawaniu kanałowego biegu pieca.

B. Rozpoznanie.

- a. diagram ciśnienia dmuchu wykazuje bardzo duże wahania,
- b. diagram sond charakteryzuje podwieszanie się wsadu, nagłe zarywania, nierówne schodzenia wsadu,
- c. duże wahania średnich temperatur gazu gardzielowego,
- d. na wykresie zawartości CO₂ – wzrost zawartości CO₂ w osiowej części pieca oraz duże wahania (w czasie) zawartości CO₂ w poszczególnych częściach obrzeżnej części pieca.

C. Przeciwdziałanie.

„Rozluźnienie” wsadu w osiowej części pieca poprzez załadunek do tej części koksu.

III.1.7. Jednostronny bieg wielkiego pieca.

A. Zjawisko to powstaje w wyniku nierównomiernego rozdziału dmuchu lub mazutu na poszczególne dysze albo nieprawidłowej pracy rynnny zasypowej aparatu zasypowego.

B. Rozpoznanie.

- a. duże różnice temperatur wykazywanych przez termopary pod gardzielą pieca,
- b. duże różnice głębokości wykazywanej przez sondy,
- c. liniowy charakter diagramu temperatur gazu gardzielowego (parami obok siebie dużej różnicy wskazań obu par).

C. Przeciwdziałanie.

- a. tak ustawić rynnę zasypową Wurtha by większe ilości materiałów wsadowych były załadowywane w ten rejon gdzie poziom zasypu jest niższy.

III.1.8. Zawieszanie się wsadu.

A. Zawieszanie wadu niezależnie od przyczyn wywołujących to zjawisko, polega na tym, że materiały wsadowe nie schodzą płynnie (oporny bieg pieca) lub w ogóle przestają schodzić w dół pieca. Zasadniczą przyczyną wywołującą to zjawisko jest mało przewiewny wsad (miał koksowy przy złym przesiewaniu koksu, spiek z nadmierną ilością podziarna lub obecność we wsadzie niesortowalnych, surowych rud) powstała w wyniku tego praca wielkiego pieca niepełnym przekrojem, przy intensywnym przepływie gazów w części pieca z gorszym lub całkowitym zanikiem przepływu w pozostałej części przekroju. Ma to miejsce przede wszystkim przy utrzymującym się dłuższy czas kanałowym biegu, nadmiernie osiowym. Rozróżnia się dwa rodzaje zawieszzeń:

III.1.9. Zawieszenie wsadu górne.

A. Zjawisko to powstaje w wyniku klinowania się materiałów wsadowych w górnej części szybu przy dowolnym stanie cieplnym wielkiego pieca.

B. Rozpoznanie.

- a. wzrasta spadek ciśnienia w górnej części szybu,
- b. wsad zawiesza się,
- c. ciśnienie gorącego dmuchu początkowo nieco spada, a następnie wzrasta w stosunku do normalnego,
- d. wzrasta zawartość CO₂ w gazie gardzielowym,
- e. dysze pracują intensywnie i w większości wypadków równomiernie,
- f. temperatura gardzieli początkowo nieco maleje, a następnie stopniowo powiększa się.

C. Przeciwdziałanie.

- a. należy przede wszystkim nie dopuszczać do całkowitego zawieszania wsadu stosując zwiększenie wilgotności i obniżenie temperatury dmuchu,
- b. zastosować bardziej obrzeżny system zasypu na 10-20 naboji,
- c. zarywać wsad przez obniżenie ciśnienia na dyszach,
- d. pierwszego zarywania dokonać po około 20 min. Od zawieszenia, a następnie w odstępach 20-30 minutowych. Dłuższe przetrzymywanie powoduje wzrost temperatury na gardzieli w. pieca, która nie może przekroczyć 300°C,
- e. górne zawieszenie wsadu można również likwidować przez krótkotrwałe obniżenie ilości dmuchu.

III.1.10. Zawieszenie wsadu dolne

A. Zjawisko to powstaje w wyniku naruszenia warunków cieplnych (temperaturowych) w dolnej części pieca. W tych warunkach gęstopłynna, ciastowata masa żużla i surówki zlepia kawałki koksu tworząc nieprzenikliwa dla gazu zaporę. Zwiększa się znacznie opór słupa materiałów wsadowych w związku z czym wzrasta ciśnienie gorącego dmuchu wraz ze spadkiem jego ilości.

B. Rozpoznanie.

- a. wzrasta spadek ciśnienia w dalszej części pieca,
- b. stopniowo wzrasta ciśnienie gorącego dmuchu, a na diagramie sond obserwuje się zarywanie wsadu, a następnie całkowite zawieszanie,
- c. rozrzut punktów temperatury gazu gardzielowego zawęża się,
- d. dysze w czasie zawieszania pracują nierównomiernie i słabo.

C. Przeciwdziałanie.

W zależności od stanu cieplnego pieca zawieszenie dzielimy na gorące i chłodne.

a. zawieszenie gorące likwidować należy przez odpowiednie podniesienie wilgoci względnie obniżenie temperatury dmuchu przez zmianę systemu załadunku na korzyść bardziej obrzeżnego. Jeżeli tymi środkami nie dało się usunąć zjawiska zawieszania wsadu, zarywanie wsadu należy przeprowadzać jak przy zawisaniu górnym, tylko przy niższym ciśnieniu dmuchu,

b. zawieszenie wsadu w zimno pracującym piecu jest jednym z poważniejszych i niebezpiecznych odchyłeń od normalnego biegu pieca. Jeżeli nastąpi ochłodzenie biegu pieca należy wszystkimi środkami przeciwdziałać zawieszaniu wsadu, zarywanie wsadu chłodno pracującego pieca należy przeprowadzać szczególnie ostrożnie. W tym wypadku bowiem przy zarywaniu grozi zalewanie dysz. Po zarywaniu wsadu należy podnosić ciśnienie możliwie najszybciej. W czasie zarywania prowadzi c staranną obserwację dysz. Wskazane jest przeprowadzenie spustów surówki częściej niż normalnie.

III.1.11. Zarośnięcie garu.

A. Zarośnięcie garu prowadzące do zmniejszenia jego użytecznej pojemności dla pomieszczenia płynnych produktów procesu wielko[piecowego na skutek nagromadzenia w garze dużych ilości mialu koksowego, nadmiernego wydzielania grafitu, nalepiania na ścianach garu tych materiałów w pomieszczeniu z gęstym żużlem. Zjawisko to jest wynikiem nieprawidłowego przebiegu procesu, schodzenia do garu nieprzygotowanych materiałów, dłuższej pracy pieca na gęstych żużlach, częstego lub długotrwałego zachodzenia pieca, pracy na wsadzie złej jakości (nadmierna zawartość mialkich tworzyw, słabego koksu) wreszcie zachodzenie samego garu dużą ilością przeciekającej wody.

B. Rozpoznanie.

- a. wzrost spadku ciśnienia między gardzielą a poziomem dysz,
- b. zmniejszenie szybkości schodzenia naboju przed spustami i ponowny wzrost po spustach,
- c. zwiększenie ilości spalonych dysz,
- d. nierówne ilościowo spusty surówki,
- e. nadmierne ilości grafitu i mialu koksowego wypływające z surówką w czasie spustów.

C. Przeciwdziałanie.

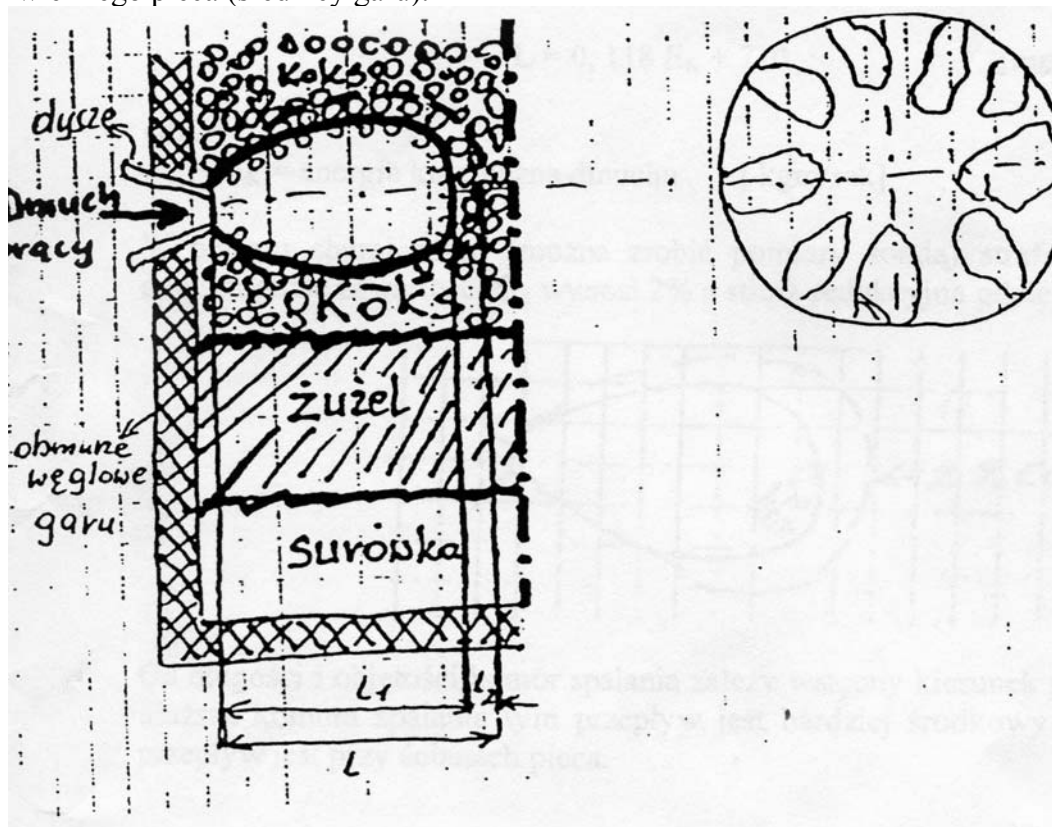
Spóźnione przeciwdziałanie zjawiska zarośnięcia garu prowadzi do poważnego i długotrwałego rozregulowania biegu pieca. Dlatego w wypadku pojawienia się pierwszych oznak zarośnięcia garu należy:

- a. obniżyć wilgotność dmuchu względnie dodatku mazutu,
- b. nie dopuszczać do ochłodzenia pieca i zawahań stanu cieplnego,
- c. w miarę możliwości obniżyć zasadowość żużli,

- d. podwyższyć płynność żużli przez podwyższanie zawartości MgO i MnO,
- e. wyeliminować możliwie największą ilość podziarna z koksu i poprawić jakość koksu,
- f. sprawdzić stan elementów chłodniczych,
- g. szczególnie skrupulatnie dotrzymywać harmonogramu spustów,
- h. utrzymywać piec na pełnym biegu i nie zmniejszać ilości dmuchu.

IV. Komory spalania – optymalizacja parametrów dynamicznych dmuchu i kształtu komór spalania.

Spalanie koksu w wielkim piecu jest głównym źródłem ciepła. Spalanie koksu w wielkim piecu następuje dopiero po jego zejściu od gardzieli aż do strefy dysz i następuje właśnie przed dyszami doprowadzającymi dmuch do pieca. Proces spalania zachodzi w tzw. komorach spalania wytworzonych energią kinetyczną i dużą szybkością dmuchu. Dmucha przez dysze wprowadzony jest do pieca z dużą szybkością i pod ciśnieniem od 2 do 4,5 atm, w zależności od wielkości i objętości wielkiego pieca (średnicy garu).



W przekroju komora spalania przed dyszami WP. Ilość dysz zależy od średnicy garu pieca i wynosi np. 32 dla pieca o ϕ garu 12m. i objętości 3200 m³ (Huta Katowice).

Długość komory spalania $l = l_1 + l_2$
gdzie:

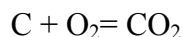
l_2 = długość strefy redukcyjnej

l_1 = długość strefy utleniającej (równoznacznej ze strefą cyrkulacji koksu).

Długość i objętość komór spalania zależy od energii kinetycznej dmuchu oraz własności fizycznych koksu. Te własności koksu to: reakcyjność, kawałkowość, porowatość, zawartość węgla.

IV.1. Reakcja spalania koksu przed dyszami przebiega w dwu etapach.

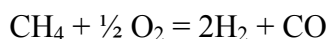
W pierwszym etapie przy wylocie dyszy znajduje się strefa utleniająca (I₁) prawie równoznaczna ze strefą cyrkulacji koksu. W tej strefie tlen dmuchu zostaje zużyty na powierzchniowe spalanie kawałków koksu w myśl reakcji:



W drugim etapie w tzw strefie redukcyjnej (I₂) powstały CO₂ reaguje z nieruchomym koksem w myśl reakcji



Gaz opuszczający komorę spalania składa się zatem z : CO, H₂ i N₂, gdyż azot nie reaguje w piecu a H₂ powstaje bądź z rozkładu pary wodnej (wilgoci) dmuchu bądź pochodzi ze spalin wprowadzonych przez dyszę paliw zastępczych (gazu ziemnego, oleju itp.) w myśl reakcji



W wyniku spalania koksu i paliwa zastępczego ustala się w komorze spalania temperatura (od 1800 do 2500°C), której maximum przypada w strefie utleniającej w miejscu gdzie występuje maximum CO₂.

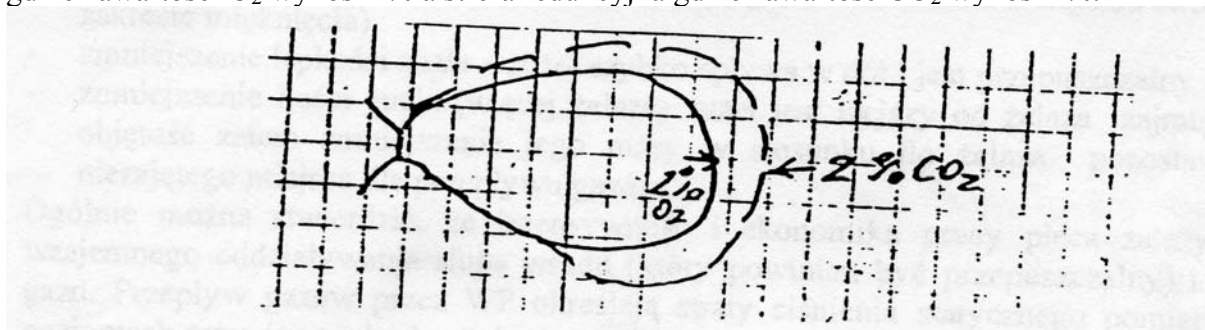
Chodak podał wzór na długość komory spalania:

$$L = 0,118 E_K + 770 \quad [mm]$$

gdzie:

$$E_K = \text{energia kinetyczna dmuchu} \quad [kgm/sek]$$

W pojęciu chemicznym (można zrobić pomiary sondą) strefa utleniająca kończy się w miejscu gdzie zawartości O₂ wynosi 2% a strefa redukcyjna gdzie zawartość CO₂ wynosi 2%.

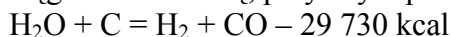


Od długości i objętości komór spalania zależy wstępny kierunek gazów przez wielki piec. Im dłuższa komora spalania tym przepływ jest bardziej środkowy a im krótsza tym bardziej przepływ jest przy ścianach pieca.

Badając skład gazu u wylotu dysz można stwierdzić, że zawartość CO₂ w tych gazach wzrasta począwszy od ryjka dysz i osiąga swe maksimum w odległości około 800mm od niego, po czym zaczyna się zmniejszać; w odległości 1200-1800 mm CO₂ zupełnie zanika. Zamiast CO₂ pojawia się CO, którego zawartość w gazie stopniowo wzrasta do około 40%. Przy spalaniu węgla koksu tlenem dmuchu objętość otrzymanego CO₂ równa się objętości tlenu. Gdy CO₂ rozkłada się pod działaniem węgla koksu na CO, wtedy z jednej objętości CO₂ otrzymuje się dwie objętości CO. W rezultacie więc ze 100 objętości suchego dmuchu, zawierającego 79 objętości N₂ i 21 objętości O₂, otrzymuje się 42 objętości CO i 79 objętości azotu, tj. 121 objętości gazu; wobec tego jego skład objętościowy przedstawia się następująco:

$$\%CO = \frac{42}{121} = 34,7 \text{ i } \%N_2 = \frac{79}{121} = 65,3$$

Powietrze dmuchu zawiera jednak zawsze pewna ilość wilgoci, które pod działaniem rozżarzonego węgla rozkłada się, przy czym powstaje wodór i tlenek węgla:



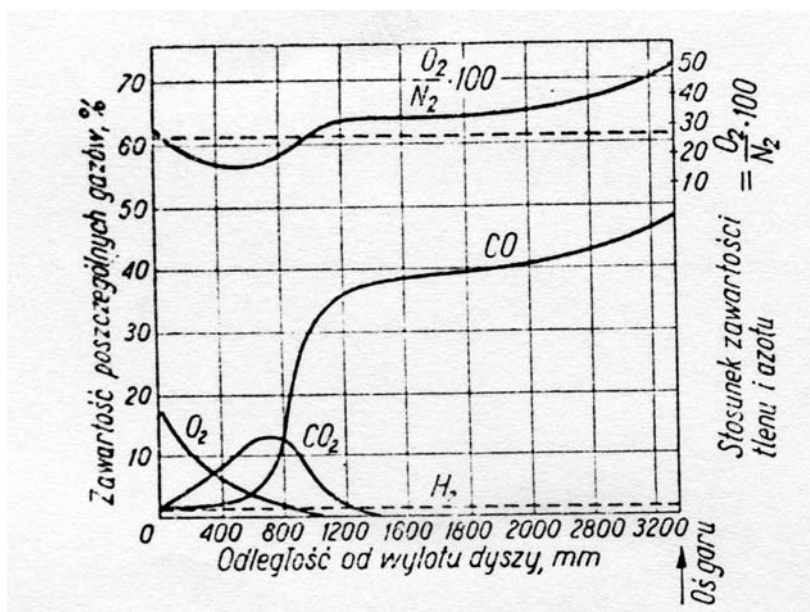
Reakcji tej towarzyszy dwukrotne powiększenie objętości, tzn., że z jednej objętości pary wodnej powstają dwie objętości gazu, złożonego w połowie z H_2 i w połowie z CO .

W następstwie tej reakcji ostateczny teoretyczny skład gazu po ukończeniu spalania węgla koksu przed dyszami, zależnie od wilgotności dmuchu, przedstawia się następująco:

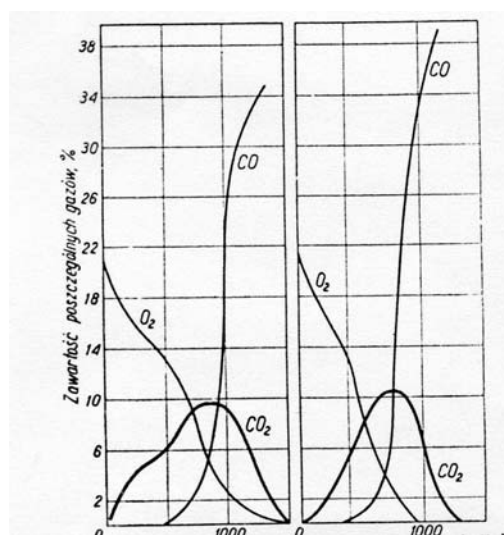
Tabela. 3. Zależność składu chemicznego dmuchu i produktów spalania od wilgotności powietrza.

Zawartość wilgoci w dmuchu		Skład w % objętościowych						
		Dmuch po rozkładzie wilgoci			Produkty spalania			$\frac{\text{O}_2}{\text{N}_2} * 100$
% obj.	g/m^3	O_2	H_2	N_2	CO	H_2	N_2	
0		21,00	0,00	79,00	34,7	0,0	63,3	26,58
0,5	4,017	21,09	0,49	78,42	34,8	0,4	64,8	26,90
1,0	8,035	21,184	0,995	77,821	35,0	0,8	64,2	27,22
1,5	12,052	21,28	1,48	77,24	35,1	1,2	63,7	27,53
2,0	16,070	21,37	1,98	76,65	35,2	1,6	63,2	27,85

Przestrzenie w garze przed każdą dyszą, w których odbywa się reakcja spalania, przyjęto nazywać komorami spalania. W odległości 1200 mm od ryjka dyszy gaz zawiera już 34,7% CO , zgodnie z wyżej opisanymi reakcjami, po czym w miarę oddalania się od ryjka dyszy zawartość CO wzrasta do około 48%. Ten wzrost CO ponad teoretyczną zawartość jest następstwem powstawania w środkowej części pieca dodatkowych ilości CO , wskutek redukcji bezpośredniej tlenku żelazowego i tlenków innych składników surówki poniżej osi dysz. Wykres zmiany składu gazów przed dyszami (rys.....) podaje wartości przeciętne, jakkolwiek odległości od ryjka dyszy, w których zanika tlen, a zawartość CO_2 osiąga maksimum, nie są stałe dla różnych pieców i mogą zmieniać się w dość szerokim zakresie. Przebieg spalania i wielkość komory spalania zależą od jakości koksu. Im grubsze są kawałki koksu, a także im mniejsza porowatość, tym mniejsza jest powierzchnia koksu, która bezpośrednio styka się z dmuchem i może z nim reagować. Dlatego, gdy piec prowadzi się na takim koksie, komory spalania zwiększają swą objętość; Odwrotnie, jeżeli koks jest drobny i porowaty, to spalanie odbywa się szybko i rozmiary komór spalania są mniejsze. Ilość dmuchu również wpływa na rozmiary komory spalania; im więcej dmuchu wprowadzamy do pieca, tym większe są komory spalania.



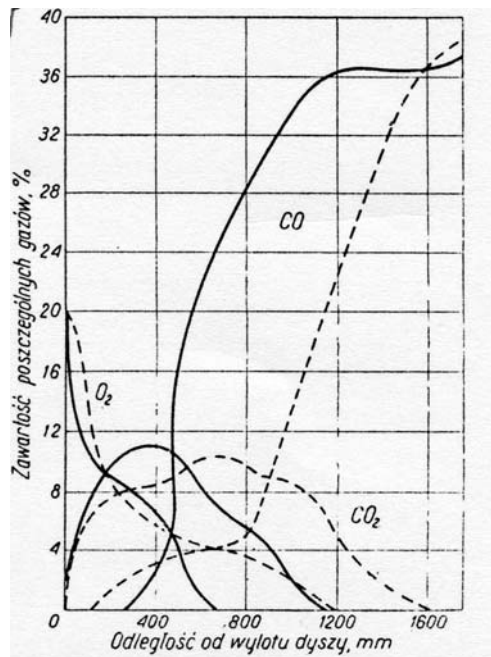
Rys. 2. Wykres składu gazu przed dyszami wielkiego pieca wg L. Króla.



Rys. 3. Zależność przebiegu spalania w garze wielkiego pieca od szybkości powietrza przy wylocie dysz.

W razie zwiększenia ciśnienia dmuchu rośnie szybkość jego wypływu z ryjków dysz i komora spalania wydłuża się w głąb pieca, zmniejszają się jednak jej wymiary poprzeczne, tj. proces spalania przebiega w mniejszej przestrzeni, a miejsce największej zawartości CO_2 odsuwa się od ryjka dyszy. Taką zmianę wymiarów komory spalania stwierdzono doświadczalnie w wielkich piecach pracujących z różnymi ciśnieniami dmuchu.

Nagrzanie dmuchu również wydatnie wpływa na wielkość strefy utleniającej przed dyszami. Podwyższenie temperatury dmuchu wywołuje wzrost temperatury spalania, co sprzyja przyspieszeniu reakcji spalania i zmniejszeniu objętości komór spalania. Zależność tę przedstawia rys 3 na którym podano przebieg spalania w garze wielkiego pieca przy temperaturach dmuchu 500 i 700°C.

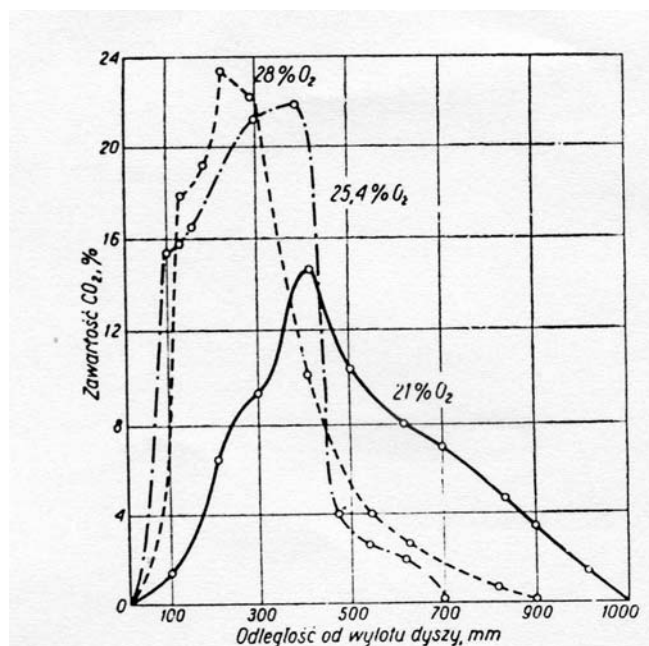


Rys. 4. Zmiana składu gazów przed dyszami wielkiego pieca przy temperaturze dmuchu 700°C (linie pełne) i 500°C (linie przerywane).

Jak wynika z wykresu, wysoka temperatura dmuchu przybliżyła ognisko spalania do ryjka dyszy, natomiast niska temperatura dmuchu powoduje rozszerzenie strefy spalania.

Specjalny wpływ na spalanie koksu w garze wielkiego pieca wywiera dmuch o zwiększonej zawartości tlenu. Jak widać z rys. zwiększenie zawartości tlenu w dmuchu działa podobnie jak podwyższenie temperatury dmuchu; ognisko spalania w miarę wzbogacania dmuchu w tlen przybliży się do ryjka dyszy, wywołując zmniejszenie się komory spalania. Zjawisko to wynika zresztą z tych samych przyczyn; gdy dmuch zawiera więcej tlenu, to koks spala się szybciej, a więc na krótszej odległości od ryjka dyszy i w mniejszej przestrzeni. Wielkość strefy spalania ma duże znaczenie dla biegu wielkiego pieca; im większe komory spalania, tym większe są też leje, którymi zasypuje się koks z góry przed dysze, tym łatwiej i równiej schodzą w dół nowe porcje materiałów. W razie zmniejszenia wielkości komór spalania kurczą się przestrzenie, do których koks może zsuwać się z góry.

Koks oraz materiały wsadowe opuszczają się więc z trudnością i zawieszają się w piecu. Od rozmiarów strefy utleniającej i położenia ogniska spalania oraz maksimum zawartości CO₂ zależy również rozkład temperatur na wysokości pieca: im większa jest strefa spalania, tym wyżej sięga strefa wysokich temperatur. Gdy przybliżamy ognisko spalania do ryjka dyszy, wtedy wysokie temperatury koncentrują się w garze tym silniej, im bardziej ścieśniona jest komora spalania.



Rys.5. Zmiana zawartości CO₂ w gazie przed dyszami wielkiego pieca przy różnej zawartości tlenu w dmuchu.

Gazy unoszące się z tej strefy oddają swe ciepło wsadowi tak, że ich temperatura w najniższej części szybu nie przekracza 1000°C, a w gardzieli pieca od ok. 100 – 200°C. Ustalenia dotyczące wymiarów komór spalania i szybkości dmuchu w dyszach są przedmiotem ćwiczeń obliczeniowych.

V. Zasady i modelowanie niektórych procesów cząstkowych zachodzących w wielkim piecu.

V.1. Strefa kohezji – mięknięcia w wielkim piecu.

Wielki piec jest najbardziej złożonym urządzeniem w zespole reaktorów do wytwarzania stali. Przyczyny tej złożoności wynikają z załadunku materiałów, których własności zależą w dużym stopniu od pochodzenia surowców, od wywiązujących się reakcji chemicznych i od zmian stanu (topnienia) we wnętrzu reaktora. Mimo tej złożoności nastąpił znaczny postęp procesu wielkopiecowego w ciągu ostatnich 20 lat. w zakresie zużycia ciepła i zdolności produkcyjnej. Jego przyszłość zdaje się być zapewniona na dość długi okres czasu, ponieważ odznacza się godną uwagi własnością, a mianowicie zużywa energię pochodzącą z węgla w ilości 90%. Jego wydajność cieplna jest poza tym doskonała, równie w przybliżeniu 90%. Aktualne dążenia sprowadzają się do jeszcze większej poprawy osiągnięć, przy czym chodzi o dwa zasadnicze kierunki.

- obniżenie kosztów zużytej energii przez zmniejszenie całkowitego zużycia ciepła, a także przez zastąpienie koksu tańszymi paliwami,
- wydłużenie kampanii przez zapewnienie możliwie najbardziej regularnej pracy poprzez stałą kontrolę zjawisk występujących we wnętrzu pieca.

Realizacja tych celów wymaga lepszej znajomości zjawisk metalurgicznych, aby zidentyfikować czynniki, które aktualnie nie są dostatecznie znane (charakterystyka wsadu, reakcje chemiczne, „zakłócenia” itd.), oraz aby znaleźć sposób ujęcia stanu reaktora (rozdział gazów, postać strefy topnienia itd.), celem lepszego opanowania sposobów działania (regulacji).

W celu pogłębienia znajomości tych zagadnień stosuje się różne metody badawcze:

- użycie doświadczalnych pieców o małym wymiarach. Tej metody praktycznie nie stosuje się już, ze względu na zniekształcenia wynikające ze zmniejszenia skali,
- szybkie ochładzanie wielkich pieców o średnich wymiarach, a następnie szczegółowa analiza pod koniec kampanii (Japonia).

Sposób ten umożliwia dokładne rozeznanie, ale jest bardzo kosztowne,

- badania przeprowadzone w czynnych wielkich piecach. Instytuty badawcze i huty przywiązują duże znaczenie do tej ostatniej, w związku z czym wielkie piece wyposażone są

w coraz bardziej dokładną i precyzyjną aparaturę pomiarowo-kontrolną (Spirotherm, sondy poziome w gardzieli i w szybie, pomiary ciśnień wzdłuż wysokości pieca itd.).

Jest rzeczą oczywistą, że w takim reaktorze jak wielki piec wydajność, zużycie koksu oraz prawdopodobieństwo przerwania stabilnej pracy pieca zależy od przepływu gazu, od wzajemnego oddziaływania przepływających gazów i cieczy oraz od wzajemnego oddziaływania przepływających gazów i ruchu materiałów stałych. Dotychczas stosowane modele matematycznego wielkiego pieca, mające na celu zapewnienie sposobu lepszego sterowania, a szczególnie poprawę warunków termochemicznych i wynikającą stąd kontrolę jakości surówki, opierają się na bilansach materiałowym i cieplnym. Sterowanie takimi modelami nie gwarantuje w pełni sterowania całością procesu bowiem nie uwzględnia zjawisk aerodynamicznych. Współczesne, naukowe sterowanie pracą nowoczesnych wielkich pieców polega na identyfikacji trzech podstawowych zjawisk w procesie wielkopieczowym tj. przenoszenie ciepła, redukcja i topnienie w pięciu oddzielnych strefach wielkiego pieca:

- strefa materiałów kawałkowych – gdzie rudy i koks zachowują uwarstwienie, które miały po załadunku,
- strefa kohezyjna – składająca się w warstw koksu oraz z warstwy częściowo stopniowej masy zlepiających się cząstek rudy,
- strefa aktywna koksu – składająca się wyłącznie z koksu przez który ścieka surówka i żużel,
- komora spalania – stanowi częściowo pusta przestrzeń, gdzie koks spala się poruszając się gwałtownie pod wpływem energii kinetycznej dmuchu z dysz,
- strefa garu – wypełniona koksem przesiąkniętym surówką i żużlem,

Surówka i żużel są produktami szeregu reakcji chemicznych zjawisk fizycznych i cieplnych. Należy zdawać sobie sprawę, że reakcje te zachodzą odmiennie nie tylko w zależności od ich lokalizacji w jednej z w/w stref lecz również w ramach tej samej strefy w zależności od usytuowania wzdłuż promienia pieca od osi do obrzeża. Przenoszenie ciepła, redukcja chemiczna i topienie się są trzema najważniejszymi reakcjami, które zachodzą w poszczególnych strefach w warunkach przeciwnych. Praca wielkiego pieca zależy również w znacznej mierze od przewodności kolumny wsadowej i od warunków przetapiania. Obecnie usiłuje się uzyskać informacje dotyczące ukształtowania się strefy kohezyjnej oraz oddziaływujących na nią czynników. Do czynników oddziaływujących, które należy uwzględnić przy optymalizacji profilu strefy kohezyjnej, zalicza się opór stawiany przepływającym gazom w wielkim piecu, obciążenie cieplne wyłożenia w strefie przestronu, wydajność procesu, stabilność pracy pieca. Zwraca się uwagę na znaczenie, jakie w dużej mierze przypada górnej części strefy kohezyjnej, od której zależy równomierna przewodność w wielkim piecu. Z dotychczasowych badań wynika, że można poprawić i osiągnąć bardziej równomierną przewodność w połączeniu z lepszym wykorzystaniem gazu i mniejszym zużyciem koksu przez wewnętrzne przesunięcie albo przez obniżenie wysokości strefy kohezyjnej. Położenie strefy kohezyjnej w wielkim piecu można stosunkowo dokładnie określić na podstawie albo pomiarów ciśnienia wzdłuż wysokości pieca albo na podstawie określenia rozkładu temperatur wzdłuż wysokości wielkiego pieca.

V.2. Identyfikacja strefy kohezyjnej na podstawie rozkładu temperatur wzdłuż wysokości wielkiego pieca – wiadomości ogólne.

Na podstawie badań wygaszonych wielkich pieców przeprowadzonych w Japonii wykazano, że można scharakteryzować w sposób globalny rozdział gazów na podstawie kształtu strefy topnienia. Warstwy spieku częściowo stopionego ułożone są w kształcie pierścieni i spełniają rolę „okien”, które rozdzielają gaz we wnętrzu szybu. Warstwa kohezyjna jest gęstą masą częściowo zredukowanych rud żelaza, która hamuje przepływ gazu. Ukształtowanie strefy kohezyjnej zależy w znacznym stopniu od sposobu zasypu, gdyż w zależności od rozkładu ruda/koks wzdłuż promienia i od ich uziarnienia, zmienia się przewodność wsadu. W przypadku stosowania

stożkowego urządzenia zasypowego następuje znaczna segregacja pod względem uziarnienia ładowanych materiałów wsadowych i koksu. Duże kawałki gromadzą się bliżej osi a drobne na obrzeżu. W związku z tym przewiewność w osi pieca jest normalnie większa niż na obrzeżu, co powoduje środkowy przepływ gazu. Powierzchnia wsadu ukształtowana normalnie w kształcie litery V, skraca drogę gazu bardziej w osi niż na obrzeżu. Jest to dodatkowy czynnik zwiększający skłonność gazów do środkowego przepływu. Z drugiej strony, kąt zsypania koksu jest zawsze bardziej stromy niż w przypadku wsadu rudnego, co powoduje utworzenie się warstw rudy osi pieca. Uważa się jednak, że ta skłonność zmniejsza się wskutek tego, że nabój rudy przepycha koks w kierunku osi pieca, czego nie czyni nabój koksowy. Ponieważ warstwa rudna wykazuje zawsze mniejszą przewiewność niż warstwa koksu, różnica kątów zsypania powinna wpłynąć niekorzystnie na środkowy przepływ gazu. Omówione wyżej trzy czynniki tzn. segregacja, powierzchnia wsadu i kąt zsypania przyczyniają się normalnie do mniejszego lub większego przepływu gazu środkiem pieca o ile oczywiście gaz w dolnej części pieca może przenikać w kierunku osi pieca. W następstwie środkowego przepływu gazu rudy ładowane w osi pieca stykają się z większymi ilościami gazu, ogrzewają się i redukują wcześniej niż rudy ładowane na obrzeżu. Wynika stąd jasno, że środkowy przepływ gazu powoduje wcześniejsze utworzenie się warstwy kohezyjnej w osi pieca niż na obrzeżu. W ten sposób scentralizowany do pewnego stopnia przepływ gazów powoduje stożkowe ukształtowanie się strefy kohezyjnej. Gaz wypływający ze szczelin strefy kohezyjnej ma temperaturę w granicach 1200°-1400°C i składa się z CO, H₂ i N₂.

W drodze do gardzieli wp. gaz ten najpierw redukuje tlenki żelaza w strefie materiałów kawałkowych a następnie nagrzewa wsad i koks. Zgodnie z tym pojawia się CO₂ i H₂O których zawartość w gazie zwiększa się, a temperatura gazu stopniowo się obniża. Temperatura i skład gazu w dowolnym miejscu w strefie kawałkowej daje wskazówkę co do ilości wsadu z koksu, z którą gaz już się zetknął. Stożkowa postać strefy kohezyjnej powoduje przeważnie wyższe temperatury i niższe temperatury i wyższe zawartości CO₂ w gazie na obrzeżu.

Możliwe są cztery charakterystyczne ukształtowania się strefy kohezyjnej w wielkim piecu, przedstawione na rys. 7. Schemat „A” ma kształt odwróconej litery V. W tym schemacie występują liczne szczeliny w warstwie koksu, które umożliwiają dużą przewiewność. Tym samym przewiewność w całym piecu jest doskonała. Ponieważ jednak w tym schemacie przepływu strefa kohezyjna występuje w pobliżu ścian pieca, gazy o wysokiej temperaturze uchodzące ze strefy mięknięcia i topienia oddziałują na ściany pieca. Niezależnie od tego strefa materiałów kawałkowych jest niewielka, a wykorzystanie gazów niedostateczne i zużycie paliwa duże.

Schemat przepływu „B” ma również kształt odwróconej litery V, przy czym jednak część środkowa jest zwężona. Obciążenie cieplne ścian jest w tym przypadku małe, ponieważ odstęp między strefą kohezyjną i ścianami pieca jest duży, w związku z czym wobec dużej strefy materiałów kawałkowych osiąga się wysokie wykorzystanie gazów. Zawężenie strefy mięknięcia i topnienia powoduje lepszą przewiewność na dwóch schematach przepływu „A” i „B”. Schemat „C” jest prawie płaski. Ten schemat stanowi przykład niedoskonałej przewiewności, która powoduje zawisanie i zarywanie wsadu. W przypadku tego schematu trudno spodziewać się ustabilizowanej pracy pieca. Schemat przepływu „D” ma kształt litery W. Mimo lepszej przewiewności niż w schemacie „C” dolna część pieca, a zwłaszcza spadki są narażone na działanie gazów o wysokiej temperaturze.

Za idealny uważa się kształt tej strefy w postaci odwróconej litery V, jednak pod warunkiem zawężania części środkowej. W takim przypadku odstęp między strefą kohezyjną a ścianami pieca jest stosunkowo duży, w związku z czym gazy o wysokiej temperaturze uchodzące ze strefy mięknięcia i topienia nie atakują bezpośrednio ścian pieca, obniżając ich obciążenia cieplne. Ponadto wobec dużej strefy materiałów kawałkowych osiąga się wysokie wykorzystanie gazów, a zawężenie strefy mięknięcia i topienia powodują lepszą przewiewność wsadu. Powierzchnia szczelin między warstwami kohezyjnymi a koksem winna być w tej strefie wystarczająco duża, aby przepuścić gaz bez nadmiernego spadku ciśnienia. Jednocześnie położenie warstw kohezyjnych na obrzeżu powinno na tyle być dostatecznie wysokie, aby surówka i żużel, które ściekają w dół pieca były odpowiednio przegrzane przed zejściem do komory spalania przed dyszami. Istnieją zatem

możliwości określenia strefy kohezyjnej również na podstawie ustalenia rozkładu temperatur czyli kształtu izoterm (800-1400°C). Bezpośrednią metodę zastosowano we Francji, gdzie opracował oryginalny sposób oparty na pomiarze kształtu izoterm przy użyciu kapsułek zawierających promieniotwórczy ksenon. Kapsułki te umieszcza się w materiałach wsadowych w znacznym punkcie promienia pieca i mierzy się czas schodzenia materiałów wsadowych, aby osiągnąć rozpatrywaną izotermę. Metodę tę wypróbowano już w dwóch wielkich piecach, z których jeden był zasilany spiekami z rud lotaryńskich a drugi spiekami hematytowymi. Pierwsze wyniki wykazały, że kształt strefy kohezyjnej może znacznie zmienić się w czasie w tym samym wielkim piecu i jest różny dla różnych wsadów. W Japonii na jednym z pracujących wielkich pieców zidentyfikowano położenie i kształt strefy kohezyjnej za pomocą pomiaru temperatury i składu gazu pobranego z kilku miejsc gardzieli i szybu. Oceniono, że strefa kohezji znajduje się w miejscu, w którym temperatura wynosi 1000°C a zawartość CO₂ jest równa 0. W oparciu o te pomiary (sond szybowych) do pomiaru gazu i temperatury w osi do obrzeża na różnych poziomach szybu określono, że zmiany kształtu izoterm w zakresie 900-1400°C jest funkcją zużycia koksu i zawartości krzemu w surówce (zużycie koksu liczone jako łączne zużycie paliwa: koks+ olej) dla temperatury wsadu przy różnych systemach załadunku i warunkach technologicznych. Również w Polsce wypracowano model identyfikacji strefy kohezji w AGH w Zakładzie Metalurgii Stopów Żelaza. Model ten dotyczy określenia kształtu izoterm a zatem rozkładu wzdłuż wysokości pieca. Można więc powiedzieć, że identyfikacja strefy kohezyjnej dla danego okresu pracy pieca a następnie wprowadzenie odpowiednich zmian parametrów technologicznych łącznie z modelem cieplno-chemicznym pozwalają na określenie właściwego położenia tej strefy dzięki czemu uzyskuje się optymalne zużycie paliwa oraz regularną pracę pieca.

V.2.1. Identyfikacja strefy kohezyjnej w wielkim piecu w oparciu o model AGH.

I. Wprowadzenie.

Sterowanie pracą nowoczesnych wielkich pieców polega głównie na identyfikacji takich podstawowych zjawisk w procesie wielkopiecowym jak redukcja, wymiana ciepła i masy oraz przewodność, zachodzących w kilku charakterystycznych strefach wielkiego pieca. Najbardziej newralgiczną jest tzw. strefa kohezyjna, w której warstwy kawałkowatego koksu poprzedzielane są warstwami częściowo stopionej i częściowo zredukowanej masy tworzyw żelazodajnych. Strefa kohezyjna oddziela strefę topienia (ściekania) od strefy przygotowawczej (kawałkowej) i odgrywa rolę dystrybutora gazu przepływającego z jednej strefy do drugiej. Stąd kształt, wielkość i wysokość poziomu występowania strefy kohezyjnej decyduje w głównej mierze o rozdziale gazów we wnętrzu szybu i w konsekwencji o technologiczno-ekonomicznych wskaźnikach procesu wielkopiecowego.

V.3. Matematyczny model izotermiczny strefy kohezyjnej i podkohezyjnej

Koncepcja modelu opiera się na zdefiniowaniu strefy kohezyjnej jako obszaru zawartego pomiędzy izotermą temperatury początku mięknięcia a izotermą temperatury końca mięknięcia stosowanych w namiarze tworzyw. Tak więc obliczenia identyfikujące strefę kohezyjną sprowadzają się do określenia poziomów pieca na których te izotermy występują. System obliczeń umożliwiający lokalizowanie dowolnych izoterm wsadu i gazu wzdłuż wysokości pieca opracowano przy założeniu podziału wielkiego pieca na kilka charakterystycznych stref. Ze względów technologicznych, uzasadnionych diametralnie różnymi warunkami pracy, oddzielnie potraktowano strefę występowania wyłącznie materiałów kawałkowych – obejmującą obszar od poziomu wsadu w gardzieli do poziomu strefy rezerwy cieplnej (1000°C) – czyli tzw. strefę przygotowawczą, a oddzielnie strefę występowania mieszaniny faz stałej i ciekłej – obejmującą obszar w zakresie temperatur 1000-1450°C – czyli tzw. strefę wytwarzającą. Ponadto ze względów technicznych – wyrażających się ograniczoną ilością punktów pomiarowych wzdłuż promieni gardzieli – wielki piec podzielono na sześć (tu może być „n”) pionowych, współśrodkowych pierścieni

cylindrycznych. W ramach matematycznego modelu wymiany masy i ciepła rozwiązuje się układy równań bilansowych zarówno dla całego wielkiego pieca jak i dla poszczególnych cylindrów, uwzględniając zróżnicowane warunki fizykochemiczne panujące w strefach przygotowawczej i wytwarzającej. Efektem końcowym obliczeń są obok lokalizacji dowolnych izoterm wsadu i gazu, następujące podstawowe parametry strefy kohezyjnej:

- górny i dolny poziom wierzchołka strefy kohezyjnej, występujące z reguły w osiowej części pieca,
- górny i dolny poziom podstawy (nasady) strefy kohezyjnej, zlokalizowane bezpośrednio przy ścianach pieca,
- górny (zewnątrzny) profil strefy kohezyjnej, odgraniczający strefę kohezyjną od strefy kawałkowej,
- dolny (wewnętrzny) profil strefy kohezyjnej, odgraniczający strefę kohezyjną od strefy ściekania,
- ilość i wielkość szczelin koksowych pomiędzy warstwami miękającymi, wyrażone tzw. aktywną wysokością strefy.

Realizacja obliczeń tak pomyślanego modelu izotermicznego jest następująca:

V.3.1. Równania bilansowe ciepłą i masy w wielkim piecu.

Bilanse, materiałowy (gazy i wsad) oraz cieplny, zarówno dla całego wielkiego pieca jak i dla poszczególnych cylindrów określa się w wyniku rozwiązywania następującego układu 5-ciu równań bilansowych. rys.1.1.

Bilans azotu:

$$\frac{28}{22,4} * N_{2g} * V_{gg} = G_{N_{2d}} + \frac{N_{2k}}{C_k} \{Y + (C_s + G_{cr}) * X\} \quad (1)$$

Bilanse wodoru:

$$\frac{2}{22,4} * H_{2g} * V_{gg} + \frac{2}{18} * W = G_{H_{2c}} + \frac{H_{2k}}{C_k} \{Y + (C_s + G_{cr}) * X\} \quad (2)$$

Bilans węgla:

$$\frac{12}{22,4} * (CO_g + CO_{2g}) * V_{gg} = G_{cd} + G_{cr} * X + Y + \frac{12}{22,4} * Z \quad (3)$$

Bilans tlenu:

$$\frac{16}{22,4} * (CO_g + 2CO_{2g}) * V_{gg} = G_{O_{2d}} + (G_{O_{2r}} + O_{rFe})X + \frac{16}{22,4} * Z \quad (4)$$

Bilans cieplny:

$$Q_r = Q_p \quad (5)$$

Poszczególne wielkości w powyższym układzie oznaczają:

$N_2, H_{2g}, CO_g, CO_{2g}$ –

$N_g, H_{2g}, CO_g, CO_{2g}$

$G_{N_{2d}}, G_{H_{2d}}, G_{cd}, G_{O_{2d}}$

C_s

G_{Cr}

$G_{O_{2r}}$

O_{rFe}

- składniki gazu gardzielowego, w %

- masy azotu, wodoru, węgla i tlenu powstałe przed dyszami z dmuchu, paliwa zastępczego i koksu, w kg/1000m³dm

- masa węgla w surówce, w kg/kg surówki

- masa węgla zużytego na redukcję krzemu, manganu, fosforu, w kg/kg surówki

- masa tlenu pochodzącego z SiO₂, MnO i P₂O₅, w kg/kg surówki

- masa tlenu pochodzącego z redukcji tlenków żelaza, w kg/kg

	surówki
N_{2k}, C_k, H_{2k}	- zawartość azotu, węgla i tlenu w koksie, w %
Q_r	- całkowite zapotrzebowanie ciepła w procesie wielkopiecowym, w KJ/1000m ³ dmuchu,
Q_p	- całkowite przychody ciepła w procesie wielkopiecowym, w KJ/1000m ³ dmuchu

Powyższe wielkości oblicza się na podstawie opracowanego wcześniej matematycznego, cieplno-chemicznego modelu procesu wielkopiecowego.

Natomiast wielkościami niewiadomymi w powyższym układzie równań są:

X	- produkcja surówki, w kg/1000m ³ dmuchu,
Y	- węgiel zużyty na redukcję bezpośrednią tlenków żelaza, w kg/1000m ³ dmuchu,
V_{gg}	-objętość wytworzonego gazu gardzielowego, w m ³ /1000m ³
W	- masa H ₂ O wytworzonego podczas redukcji tlenków żelaza wodorem, w kg/1000m ³ dmuchu,
Z	- objętość niezbilansowanego tlenu węgla, w m ³ /1000m ³ dm

Powyższy układ równań rozwiązuje się metodą iteracyjną, zarówno dla całego wielkiego pieca jak i dla poszczególnych sześciu cylindrów. W przypadkach gdy wielkość niezbilansowanego tlenu węgla (Z) – liczona jako suma z wszystkich cylindrów - przekracza założoną wartość krytyczną, dokonuje się wstępnej korekty analizy gazów gardzielowych w poszczególnych cylindrach. Następnie realizuje się obliczenia: średniej prędkości schodzenia wsadu w całym wielkim piecu, prędkości schodzenia wsadu w poszczególnych cylindrach, masowego rozkładu wsadu wzdłuż promieni gardzieli wielkiego pieca oraz objętościowego rozdziału zmodyfikowanego dmuchu na poszczególne cylindry (rys.8). Doprowadzenie do zgodności bilansów cieplno-materiałowych poszczególnych cylindrów z całym wielkim piecem realizowane jest przez korygowanie analizy gazów gardzielowych w poszczególnych cylindrach w stosunku do średniej analizy gazu gardzielowego z całego wielkiego pieca (schemat) oraz przez sprawdzenie zgodności temperatury gazu gardzielowego zmierzonej w rurociągu zbiorczym ze średnią ważoną temperaturą gazów gardzielowych z wszystkich cylindrów (schemat). Niespełnienie któregokolwiek z dwóch powyższych kryteriów powoduje skierowanie skorygowanych wielkości do bazy danych i powtórzenie dotychczasowego cyklu obliczeń. Procedura korygowania danych kończy się z chwilą, gdy suma bilansów cieplno-materiałowych poszczególnych cylindrów pokryje się w przybliżeniu z bilansem cieplno-materiałowym całego wielkiego pieca.

V.4. Lokalizowanie izoterm wsadu i gazu w strefie przygotowawczej.

Zgodnie z modelem Rista, strefa przygotowawcza obejmuje temperatury w zakresie:

- dla wsadu: od temperatury powierzchni wsadu w gardzieli pieca do temperatury wsadu równej 1000°C,
- dla gazu: od temperatury gazu na powierzchni wsadu w gardzieli do temperatury gazu w strefie, w której wsad osiąga temp. 1000°C.

Przy założeniach, że w strefie tej nie zachodzi reakcja redukcji bezpośredniej FeO, a strumienie pojemności cieplnej gazu i wsadu są wielkościami stałymi, wymianę ciepłą pomiędzy gazem i wsadem można zapisać w postaci następującego układu dwóch równań różniczkowych (rys.1.s)

$$\frac{d(W_g * T)}{dz_s} = K_1 * S(T - t) \quad (6)$$

$$\frac{d(W_s * t)}{dz_s} = K_1 * S(T - t) \quad (7)$$

gdzie:

W_g	- strumień pojemności cieplnej gazu, w KJ/godz
T	- temperatura gazu na poziomie odpowiedniej izotermy wsadu, w °C
K_1	- współczynnik przenikania ciepła pomiędzy gazem a wsadem w strefie przygotowawczej, w KJ/godz.m ³ °C
S	- powierzchnia k-tego cylindra, w m ²
t	- temperatura wsadu dla odpowiedniej izotermy, w °C
W_s	- strumień pojemności cieplnej wsadu, w KJ/godz.°C
Z_s	- poziom na którym zlokalizowana jest odpowiednia izoterma wsadu, liczony od poziomu zera technologicznego, w metrach

Przyjmując początkowe warunki całkowania t_0 i T_0 rozwiązaniem w/w układu równań są zależności:

$$Z_s = \frac{W_s}{K_1 * S(\alpha - 1)} \ln \frac{\alpha(t - t_0) + T_0 - t}{T_0 - t_0} \quad (8)$$

$$T_z = \frac{\alpha(T_0 - t_0)}{\alpha - 1} \exp \frac{K_1 * S}{W_s} (\alpha - 1) Z_s + \frac{\alpha * t_0 - T_0}{\alpha - 1} \quad (9)$$

gdzie nie wyjaśnione wcześniej wielkości oznaczają:

Z_s	- wysokość poziomu pieca, na którym występuje izoterma wsadu t , w metrach
t_0	- temperatura wsadu ziemnego w chwili jego ładowania do pieca (warunek początkowy całkowania równań 6-7), w °C
T_0	- temperatura gazu gardzielowego na powierzchni wsadu w gardzieli (warunek początkowy całkowania równań 6-7), w °C,
α	- stosunek W_s do W_g , (-)
T_z	- temperatura gazu na poziomie, gdzie wsad osiąga temperaturę t , w °C.

Wstawiając do równania (8) dowolnie wybrana temperaturę wsadu (jednak w zakresie od t_0 do 1000°C) określa się poziom Z_s , na którym ta założona temperatura występuje. Wstawiając do równania (9) obliczony poziom Z_s , określa się temperaturę gazu T_z na poziomie Z_s . Ekstrapolując uzyskane w poszczególnych cylindrach punkty reprezentujące poziomy występowania wybranej temperatury wsadu lub gazu, uzyskuje się wykresy izoterm wsadu lub gazu na tle przekroju wielkiego pieca. Bez względu na zaplanowaną ilość szukanych izoterm, każde obliczenie kończy się obligatoryjnym zlokalizowaniem izotermy wsadu w temperaturze 1000°C. Jest to bowiem niezbędne dla określenia warunków brzegowych koniecznych do obliczeń identyfikujących izotermy wsadu i gazu w strefie wytwarzającej (początkowe warunki całkowania równań bilansowych dla strefy wytwarzającej).

V.5. Lokalizowanie izoterm wsadu i gazu w strefie wytwarzającej

Zgodnie z modelem Rista, strefa wytwarzająca obejmuje temperatury w zakresie:

- dla wsadu: od temperatury 1000°C do temperatury 1450°C,
- dla gazu: od temperatury gazu w strefie gdzie wsad ma temperaturę 1000°C, do temperatury gazu w strefie w której wsad osiąga temperaturę 1450°C.

W strefie tej w wyniku reakcji redukcji bezpośredniej FeO zachodzi w miarę schodzenia wsadu w dół pieca – zmniejszenie masy wsadu i gazu. W warunkach ruchu przeciwnoobrotowego, zjawisko to można zapisać w postaci dwóch równań różniczkowych:

$$\text{dla gazu: } \frac{dG_g}{dz} = 2,33R * S \quad (10)$$

$$\text{dla wsadu: } \frac{dG_s}{dz} = -2,33 * S \quad (11)$$

gdzie: G_g - masa gazu przepływającego przez strefę w kg/godz,
 G_s - masa wsadu schodzącego przez strefę, w kg/godz,
 dz - przedziały wysokości pieca, w metrach,
 R - wydajność reakcji redukcji bezpośredniej Fe) w strefie wytwarzającej. liczoną masą zużytego w tej reakcji węgla, w kgC/m^3 wsadu, godz,
 S - powierzchnia k-tego cylindra, m^2 .

Wsad pobiera ciepło z gazu w ilości niezbędnej na jego podgrzewanie, redukcję bezpośrednią oraz straty ciepła. Zatem bilans przekazywania ciepła z gazu do wsadu, w warunkach ruchu przeciwnoobrotowego, można przedstawić w formie następujących dwóch równań różniczkowych:

$$\text{dla gazu: } \frac{d(W_g * T_{iz})}{dz} = -K_2 * S(T_{iz} - t_{iz}) + \Delta H * R * S \quad (12)$$

$$\text{dla wsadu: } \frac{d[(W_s + G_{str}) * t_{iz}]}{dz} = K_2 * S(T_{iz} - t_{iz}) - \Delta H * R * S \quad (13)$$

gdzie niewyjaśnione wcześniej wielkości oznaczają:

W_g - strumień pojemności cieplnej gazu w strefie wytwarzającej w $\text{KJ/godz } ^\circ\text{C}$,
 T_{iz} - temperatura gazu w strefie wytwarzającej, w $^\circ\text{C}$
 K_2 - współczynnik przenikania ciepła pomiędzy gazem a wsadem w strefie wytwarzającej, w $\text{KJ/godz m}^3\text{ }^\circ\text{C}$
 t_{iz} - temperatura wsadu w strefie wytwarzającej, w $^\circ\text{C}$
 ΔH - ciepło reakcji redukcji bezpośredniej $\text{FeO} + \text{C} = \text{Fe} + \text{CO}$ w strefie wytwarzającej, w KJ/kgC ,
 W_s - strumień pojemności cieplnej wsadu w strefie wytwarzającej, w $\text{KJ/godz } ^\circ\text{C}$,
 G_{str} - straty ciepła w strefie wytwarzającej k-tego cylindra, w KJ/godz .

Mając na uwadze, że w wyniku zmian masy gazu i wsadu zmieniają się strumienie pojemności cieplnej gazu i wsadu, a ze zmianą temperatury zmieniają się również ciepła właściwe gazu i wsadu oraz entalpia reakcji redukcji bezpośredniej FeO, układ równań 10-13, po jego rozwiązaniu metodą numeryczną – z postępowaniem $dz = \Delta Z$, w kierunku od góry w dół pieca – przyjmie postać (rys.1.7):

$$T_{iz(i+1)} = T_{iz(i)} + \Delta Z \frac{S}{W_g} \{K_2 [T_{iz(i)} - t_{iz(i)}] + R[\Delta H + 2,33(-C_{pg} * T_{iz(i)})]\}$$

$$t_{iz(i+1)} = t_{iz(i)} + \Delta Z \frac{S}{W_s + G_{str}} \{K_2 [T_{iz(i)} - t_{iz(i)}] - R[\Delta H + 2,33 * C_{pw} * t_{iz(i)}]\}$$

$$G_{g(i+1)} = G_{g(i)} - 2,33 * R * S * \Delta Z$$

$$G_{s(i+1)} = G_{s(i)} - 2,33 * R * S * \Delta Z$$

$$N_{(i+1)} = N_{(i)} - 2,33 * R * S * \Delta Z$$

$$Z_{(i+1)} = Z_{(i)} + \Delta Z$$

gdzie niewyjaśnione wcześniej wielkości oznaczają:

$T_{iz(i+1)}$ - temperatura gazu na poziomie odpowiadającym cyklowi obliczeniowemu (i+1), w $^\circ\text{C}$,

$T_{iz(i)}$ - temperatura gazu na poziomie odpowiadającym cyklowi obliczeniowemu

	(i), w °C,
ΔZ	- zakładany przedział wysokości pieca przy rozwiązaniu równań różniczkowych metodą numeryczną w metrach,
C_{pg}	- średnie ciepło właściwe gazu w strefie wytwarzającej, na poziomie izotermi gazu T_{iz} , w KJ/kg gazu °C,
C_{pw}	- średnie ciepło właściwe materiałów wsadowych w strefie wytwarzającej, na poziomie izotermi wsadu t_{iz} , w KJ wsadu °C,
$G_{g(i+1)}$	- masa gazu przepływającego przez strefę w cyklu obliczeniowym (i+1), w kg/godz,
$G_{g(i)}$	- masa gazu przepływającego przez strefę w cyklu obliczeniowym (i), w kg/godz
$G_{s(i+1)}$	- masa wsadu schodzącego przez strefę w cyklu obliczeniowym (i+1), w kg/godz,
$G_{s(i)}$	- masa wsadu schodzącego przez strefę w cyklu obliczeniowym (i), w kg/godz,
$N_{(i+1)}$	- masa CO w gazie przepływającym przez strefę w cyklu obliczeniowym (i+1), w kg/godz,
$N_{(i)}$	- masa CO w gazie przepływającym przez strefę w cyklu obliczeniowym (i), w kg/godz,
$Z_{(i+1)}$	- poziom $Z_{(i)} + \Delta Z$, na którym szukane będą temperatury gazu i wsadu w cyklu obliczeniowym (i+1), w metrach,
$Z_{(i)}$	- założony poziom wielkiego pieca – w obrębie strefy wytwarzającej na którym szukane będą temperatury gazu i wsadu w cyklu obliczeniowym (i), w metrach.

Wszystkie wielkości pomocnicze występujące w/w układzie równań wylicza się z bilansów ciepłno-materiałowych strefy wytwarzającej (schemat). Natomiast czas przebywania materiałów wsadowych w strefie temperatur 1000-1450°C, niezbędny do obliczania wydajności reakcji redukcji bezpośredniej FeO, określa się metodą kolejnych przybliżeń. Pierwsze przybliżone założenie poziomu występowania izotermi wsadu 1450°C narzuca orientacyjny czas przebywania wsadu w tej strefie. Przekształcenie tego orientacyjnego czasu w rzeczywisty kończy się z chwilą zminimalizowania różnicy pomiędzy poziomem izotermi 1450°C w sąsiednich cyklach obliczeniowych.

Zależności 14-19 stanowią podstawowy układ równań, rozwiązywania którego pozwala na określanie położenia dowolnych izoterm wsadu i gazu w strefie wytwarzającej. Obliczenia, dla każdego cylindra (k_1 - k_6) oddzielnie, rozpoczynają się zawsze przy założeniach, że temperatura wsadu $t_{iz(i)}$ wynosi 1000°C, a przedział wysokości pieca ΔZ – związany z numeryczną metodą rozwiązywania równań różniczkowych – wynosi zero. W następnym cyklu obliczeń tzn. w (i+1) przyjmuje się umownie wielkość ΔZ (np. 0,1 m), uzyskując wielkości temperatur wsadu $t_{iz(i+1)}$ i gazu $T_{iz(i+1)}$ na wysokości pieca Z_{iz} wsadu w 1000°C + ΔZ . W kolejnych cyklach obliczeniowych zwiększa się „Z” o kolejne ΔZ , aż do momentu uzyskania temperatury wsadu $t_{iz(i+n)}$ równej ok. 1450°C.

Ekstrapolując uzyskane w poszczególnych cylindrach punkty – reprezentujące poziomy występowania wybranej temperatury wsadu lub gazu uzyskuje się wykresy izoterm wsadu lub gazu na tle przekroju wielkiego pieca. Znając temperatury początku i końca mięknięcia stosowanych w namiarze tworzyw, uzyskuje się więc zarys strefy kohezyjnej wraz z jej podstawowymi parametrami (rys.1.9, 1.10):

- poziomy występowania górnej i dolnej powierzchni strefy kohezyjnej,
- grubość wierzchołka strefy kohezyjnej,
- grubość nasady strefy kohezyjnej,
- aktywna wysokość strefy kohezyjnej.

V.6. Zasady optymalizowania strefy kohezyjnej i podkohezyjnej.

Taktyka prowadzona współczesnych jednostek wielkopiecowych z lekką tendencją do biegu środkowego determinuje kształt strefy kohezyjnej w kształcie odwróconej litery V. Za teoretycznie optymalny przyjmuje się taki profil strefy kohezyjnej, w przypadku, którego proces mięknięcia zachodzi w możliwie wąskim interwale temperatur oraz w możliwie wysokich temperaturach.

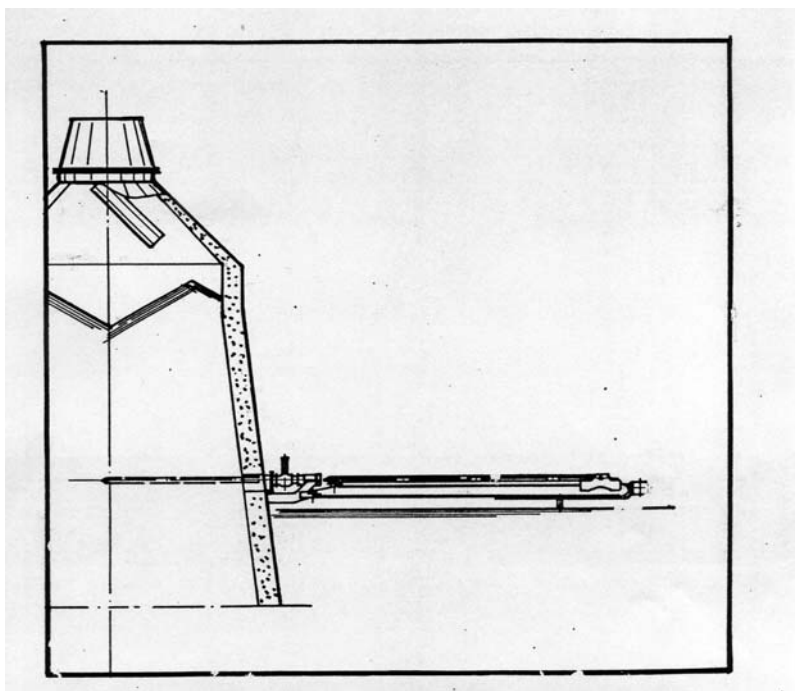
Optymalizacja strefy kohezyjnej w odniesieniu do rodzaju stosowanych tworzyw żelazodajnych sprowadza się do ograniczenia zróżnicowania ich własności fizykochemicznych. Materiały kwaśne mięknią na ogół w szerszym interwale temperatur i posiadają zazwyczaj niższą temperaturę mięknięcia, która jest ponadto bardziej zależna od stopnia redukcji danego tworzywa. Stąd równoczesna obecność w namiarze materiałów kwaśnych i zasadowych powoduje pogrubienie strefy kohezyjnej, pogorszenie przepuszczalności gazów i trudności w schodzeniu wsadu, co w konsekwencji powoduje pogorszenie pracy strefy przygotowawczej i kolejne pogrubienie strefy kohezyjnej.

Optymalizacja strefy kohezyjnej w odniesieniu do parametrów w dyszach winna polegać na stworzeniu w strefie dysz warunków umożliwiających otrzymanie gazu o silnej zdolności redukującej i wysokiej entalpii, aby redukcja i topienie przebiegały przy minimalnym zużyciu gazu na tonę surówki.

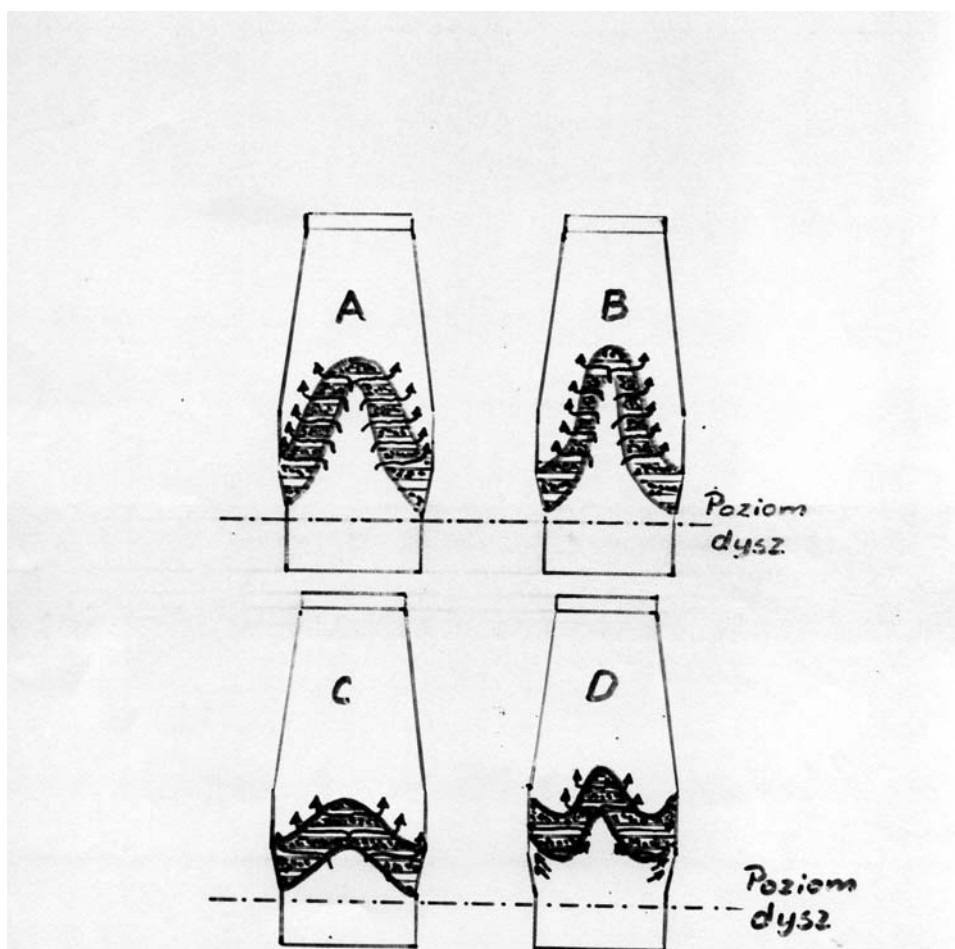
Zewnętrzny profil strefy kohezyjnej winien być lekko wklęsły, aby gazy uchodzące przez szczeliny koksowe nie atakowały bezpośrednio ścian pieca, co wiąże się z ochroną wyłożenia ścian pieca oraz ze zmniejszeniem strat ciepła uchodzącego przez ściany pieca. Przesunięcie pionowe strefy kohezyjnej w kierunku garu wielkiego pieca powoduje zwiększenie objętości strefy kawałkowej (nad strefą kohezyjną), a więc poprawia wymianę ciepła między gazem i fazą stałą. Obniża się więc temperatura gazu gardzielowego, wzrasta współczynnik wykorzystania gazu η_{CO} i zwiększa się stosunek redukcji pośredniej do bezpośredniej, co w konsekwencji powoduje wzrost produkcji i spadek zużycia koksu. Przesunięcie strefy kohezyjnej w dół pieca nie może być jednak nadmierne, aby zachować krytyczną odległość pomiędzy wewnętrznym profilem strefy kohezyjnej a zewnętrzną powierzchnią martwego słupa koksu. Przestrzeń ta, nazwana strefą ściekania, jest bowiem regulatorem ilości koksu schodzącego w kierunku komór spalania przed dyszami. Wielkość tej strefy ma również znaczący wpływ na zawartość krzemu w surówce. Wzrost objętości strefy ściekania wydłuża kontakt gazu z ciekłym metalem. W takim przypadku wzrasta więc ilość ciepła przenoszonego z gazu do ciekłego metalu, a w konsekwencji wzrasta jego temperatura i zawartość w nim krzemu.

Na kształt i wysokość położenia strefy kohezyjnej, jak również na pożądaną w procesie wielkopiecowym symetryczny profil tej strefy, można wpływać kontrolowanymi zmianami głównie parametrów zasypu oraz w nieco mniejszym stopniu parametrami w dyszach.

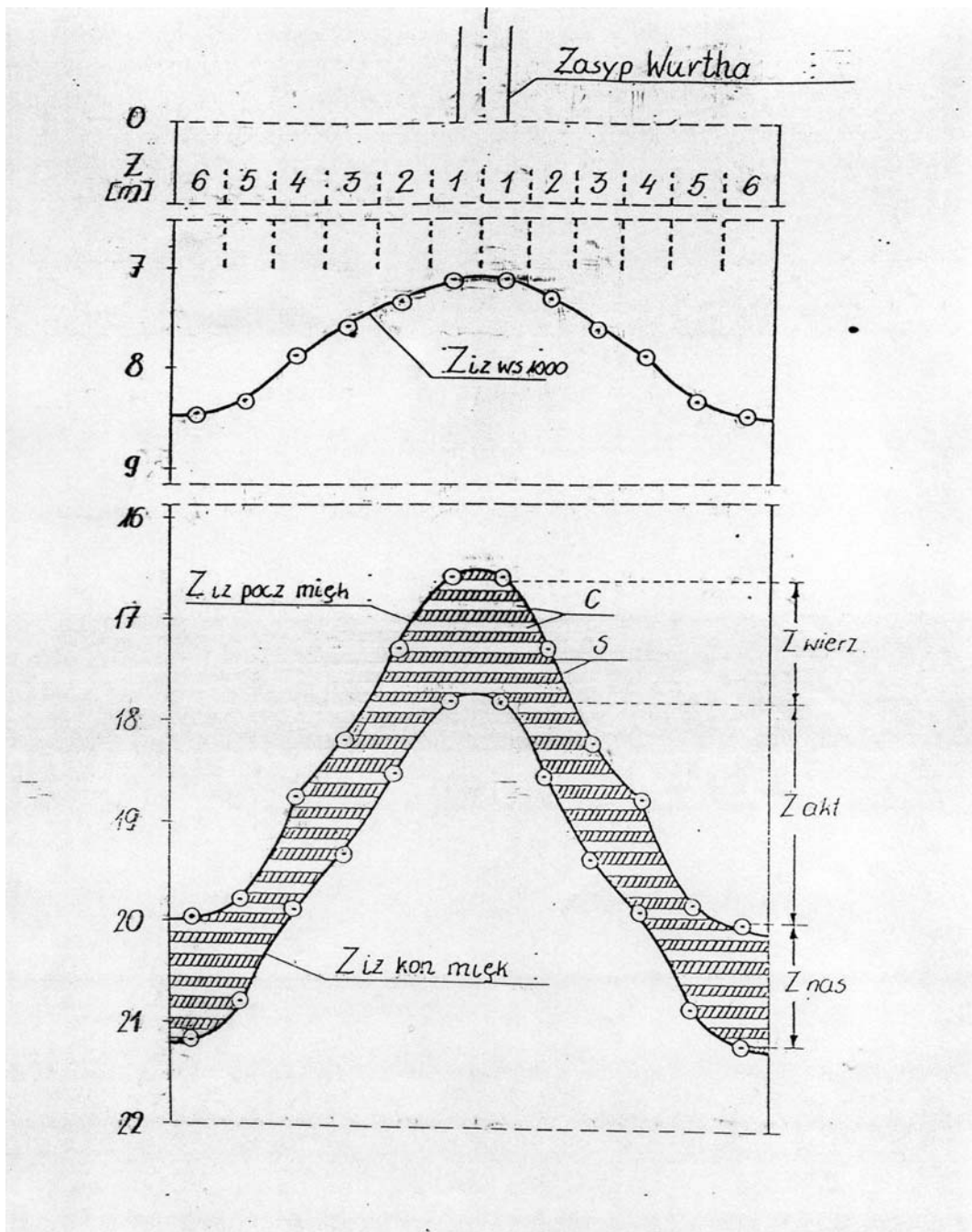
Zastosowanie przedstawionego modelu w praktyce przemysłowej stwarza technologowi warunki do bardziej racjonalnego prowadzenia procesu. Możliwość identyfikowania kształtu i wysokości położenia strefy kohezyjnej daje mu bowiem do ręki dodatkowy parametr, umożliwiający optymalizowanie procesów wymiany ciepła i masy w wielkim piecu, a w konsekwencji optymalizowanie wielkości produkcji i zużycia paliwa.



Rys.6. Sonda podwadowa do pomiarów składu gazów, ich ciśnienia i temperatury.



Rys. 7. Zróznicowany przepływ gazów w wielkim piecu.



Rys. 8. Obliczony kształt strefy kohezji przy 6 pkt pomiarowych sondy.

Przykłady obliczeń położenia strefy koczji w piecu o średnicy garu równej 12m, dla wsadu złożonego z: a - 100% spieku, b - 95% spieku i 5% grudek oraz c - 70% spieku i 30% grudek.

Parametr	Jednostka	Przykład	1	2	Numer 3	cyindr 4	5	6
Dmucha	m ³ /h	a	8550	25160	41570	57980	74810	91970
		b	8850	26940	44340	61690	77540	89920
		c	8640	24480	39970	56620	70930	79810
Produkcja	Mg/h	a	8.11	24.45	40.37	55.79	71.52	85.42
		b	8.50	22.70	39.06	54.54	71.61	78.16
		c	7.77	23.46	40.58	55.69	72.72	96.75
Gaz gardz	m ³ /h	a	12900	38500	62800	87200	113500	139200
		b	14100	40800	68100	94600	120400	130700
		c	13000	37300	61200	85800	108400	127900
Masa koks	kg/nab	a	601	1776	2907	4002	5148	6185
		b	663	1800	3055	4237	5437	5645
		c	595	1681	2844	3952	5021	6177
Masa spieku	kg/nab	a	2471	7450	12300	16994	21786	26021
		b	2450	6543	11258	15720	20640	22529
		c	1613	4866	8418	11552	15086	20071
Masa grudek	kg/nab	a	0	0	0	0	0	0
		b	123	329	567	792	1040	1135
		c	660	1993	3448	4732	6180	8222
Masa topnika	kg/nab	a	15	46	75	104	134	169
		b	0	0	0	0	0	0
		c	132	400	693	951	1242	1652
Z ₁₀₀₀	m	a	7.09	7.28	7.60	7.86	8.29	8.44
		b	7.35	7.70	7.75	8.22	8.65	8.86
		c	7.61	7.34	7.35	8.28	8.51	7.72
Z _n ton	m	a	16.59	17.28	18.20	18.76	19.79	20.04
		b	16.25	16.70	16.95	18.12	18.95	18.06
		c	14.61	14.54	14.85	16.98	17.61	16.42
T _{g n} ton	°C	a	1331	1332	1340	1333	1343	1340
		b	1255	1243	1246	1256	1253	1260
		c	1136	1138	1140	1139	1142	1146
Z _k ton	m	a	17.79	18.48	19.30	19.86	20.79	21.14
		b	18.05	18.50	18.75	19.72	20.55	20.26
		c	19.11	18.74	18.85	20.88	21.31	20.02
T _{g k} ton	°C	a	1507	1521	1524	1518	1516	1532
		b	1516	1494	1511	1504	1517	1513
		c	1472	1504	1506	1500	1508	1561
Z _{wierz}	m	a = 1.2		b = 1.8		c = 4.5		
Z _{nas}	m	a = 1.1		b = 1.4		c = 3.6		
Z _{akt}	m	a = 2.25		b = 0.81		c = 0		

Zakresy mięknięcia powyższych kompozycji wsadu:

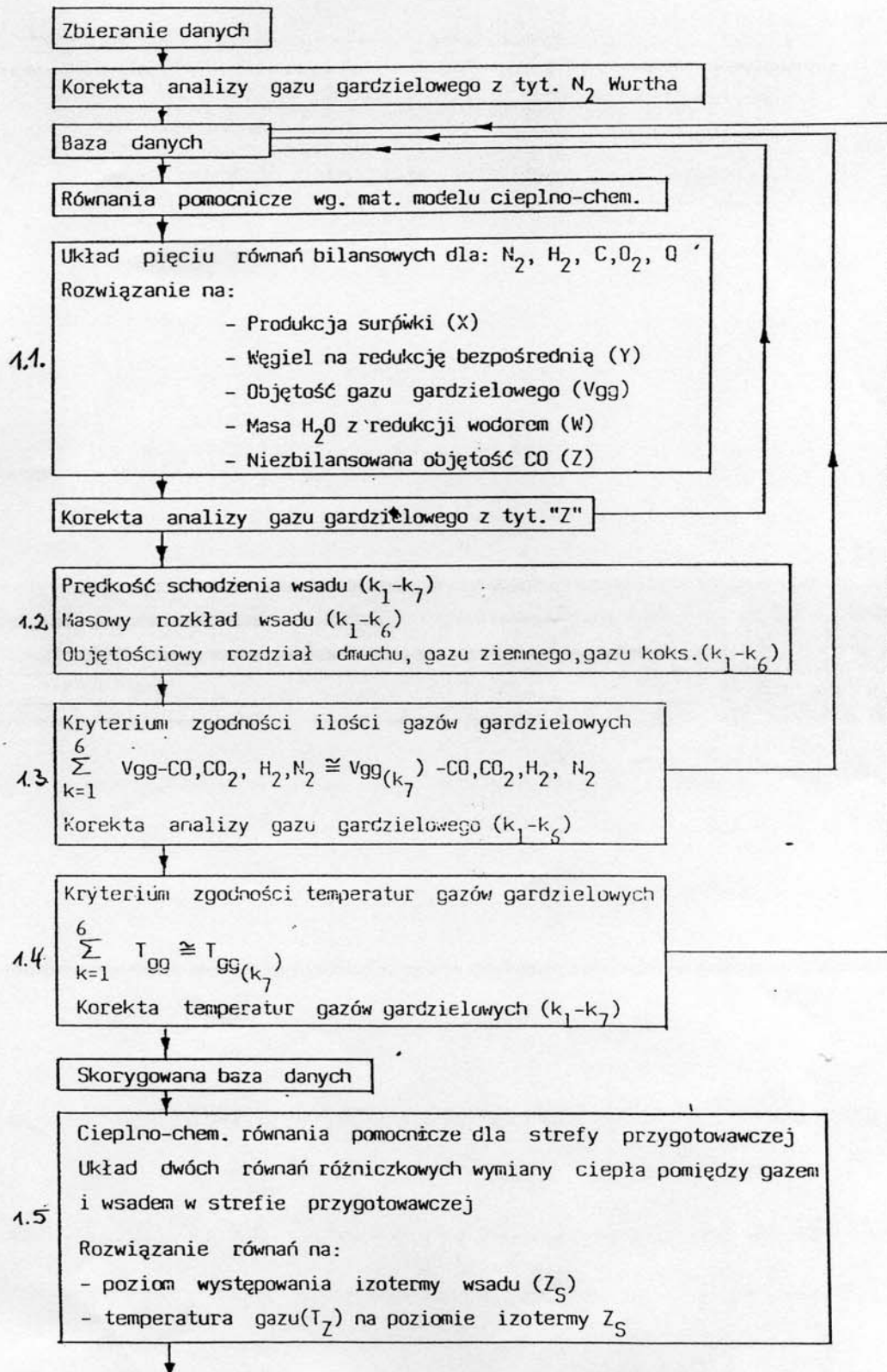
a - 1170 - 1240°C,

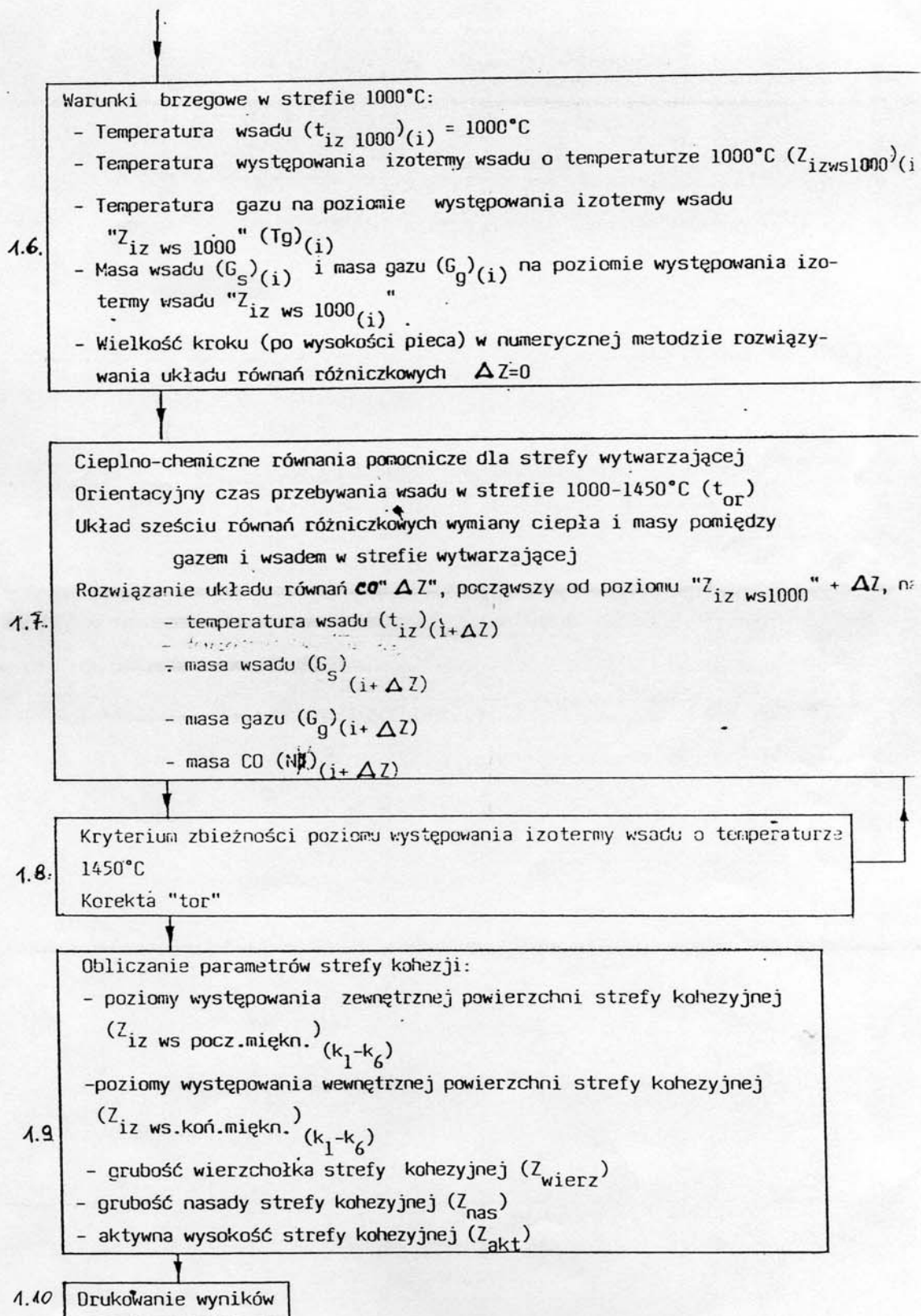
b - 1140 - 1240°C,

c - 1085 - 1225°C.

Tabela.4.

Schemat funkcjonowania modelu





VI.. Strefa podkohezyjna.

Jest częścią strefy wytwarzającej wg. klasycznego podziału. Strefa wytwarzająca zaczyna się od 1000°C i kończy w garze. Strefa podkohezyjna zaczyna się w dolnej izotermie strefy kohezji (mięknienia). Na tej granicy i pod nią zaczynają powstawać płynne produkty takie jak żużel pierwotny a nieco później metal o znacznie różnym składzie od tego wypuszczanego z pieca. Strefę tę wypełnia aż do garu stały koks, który dopiero przed dyszami się spala. W osi pieca i nieco od niej koks w ogóle się nie porusza tworząc martwy słup w postaci stożka o podstawie równej odległości pomiędzy komorami spalania. Stożek ten jest nasiąknięty metalem i żużlem. Powinien mieć jak najmniejszą objętość (a zatem podstawę i wysokość), bowiem koks z niego nie uczestniczy lub prawie nie uczestniczy w procesach chemicznych i cieplnych. Pomiędzy kawałkami koksu są wolne przestrzenie przez które spływają płynne produkty wytopu (poza stożkiem) a w górę przemieszcza się gaz. Warunki zatem przemieszczania się w/w mediów w tej strefie są najtrudniejsze w całym wielkim piecu. Może dochodzić do stanów awaryjnych takich, jak brak spływania materiałów czyli zawisanie wsadu połączonego z bardzo dużym wzrostem ciśnienia gazu, dmuchu i obniżeniem objętości przyjmowanego przez piec w dyszach dmuchu.

Powody tego mogą być następujące:

- a. duża masa żużla (przy mało bogatym w Fe wsadzie) zatykająca wolne przestrzenie dla przepływu gazu w górę. Gaz może podnosić żużel w górę przez co żużel wchodzi w strefę niższych temperatur (w górę pieca) i może skrzepnąć tworząc wtedy nieprzepuszczalne sklepienie i dla ruchu wsadu i dla ruchu gazów. Nazywa się to zawisaniem wsadu. Można to zlikwidować przez nagłe zamknięcie dmuchu i zarywanie (brak ciśnienia podpierającego wsadu) sklepienia, które wraz z wsadem spada do garu. Czynność tę należy wykonywać po spuście, gdyż w przeciwnym wypadku na skutek oberwania się wsadu surówka i żużel z garu mogą podnieść swój poziom i zalać dysze (potem byłby duży postój na wymianę zestawów dyszowych i straty w produkcji).
- b. jeśli masa żużla jest duża ale nie tak jak w przypadku „a” to zjawisko jest podobne tylko bez tworzenia się sklepienia. Płynne produkty co jakiś czas przy znacznym wzroście ciśnienia gazu pod nimi przepuszczają część gazu przez co wsad może w jednej chwili obniżyć się o znaczną odległość w dół. Nie jest to tak znaczny problem jak w przypadku „a” ale piec pracuje nierówno wchodząc w tak zwany bieg zarywkowy, który obniża produkcję. Ten sam efekt jest gdy żużel spływający ma nieodpowiedni skład i temperaturę i jest gęsty (duża lepkość dynamiczna). Może to nastąpić nawet przy małej ilości żużla czyli przy bogatym wsadzie.
- c. koks jest mało wytrzymały przez co powstaje dużo małych kawałków i pyłu powodując zatykanie wolnych przestrzeni dla ruchu gazu w górę i płynnych produktów wytopu w zależności od skali tego zjawiska może nastąpić zarówno zawisanie wsadu jak i bieg zarywkowy. Mogą wtedy następować narosty węglowo alkaliczne zmniejszające średnicę przepływu lub przepalające dysze.
- d. strefa kohezji ma kształt spłaszczony przez co jest mało okien koksowych do uchodzenia gazu przez strefę kohezji w strefę materiałów stałych. Zwykle następuje bieg zarywkowy. Z uwagi na powyższe należy pilnować by:
 - strefa kohezji miała kształt smukły o dużej ilości okien koksowych,
 - stosować wsady bogate w żelazo aby zmniejszyć jednostkową masę żużla,
 - skład żużla powinien zapewnić jego niską lepkość dynamiczną (mała gęstość czyli duża płynność),
 - podstawa strefy kohezji powinna być nisko usytuowana w piecu aby droga ściekania płynnych produktów do garu była krótka.

Najnowsza technologia przewiduje kontrolę wsadu to jest kompensacji naważania i składu chemicznego oraz gazu: składu chemicznego i temperatury, co pozwala modelować kształt strefy kohezji i na bieżąco kontrolować schodzenie wsadu w piecu.

Oprócz wyżej wymienionych procesów i zjawisk w strefie podkohezyjnej podczas ściekania przez koks żużli i metali następuje:

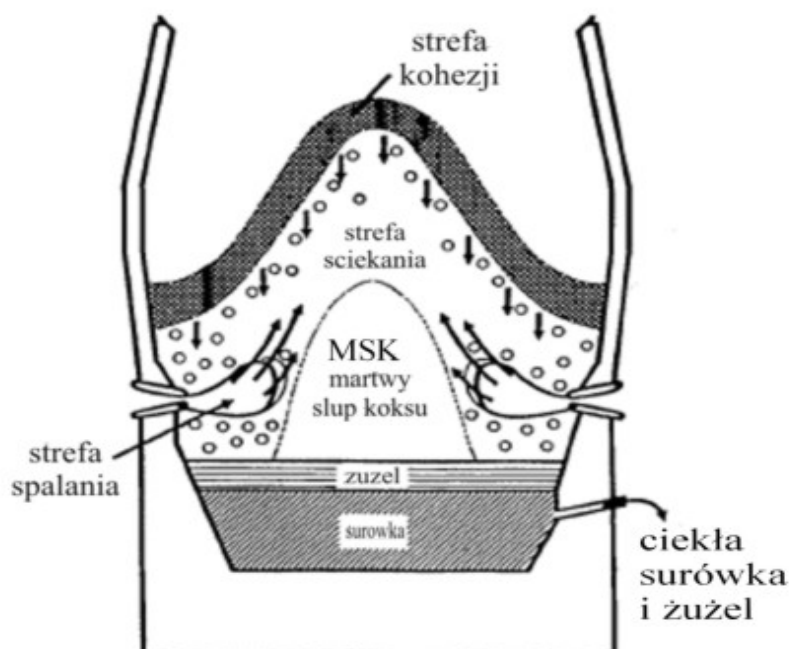
- nawęglanie metalu węglem koksu,
- reakcja redukcji fosforu,
- utlenianie Si i SiO,
- częściowo redukcja bezpośrednia związków Fe, SiO₂, MnO,
- częściowo reakcja nasiarczania i odsiarczania metalu,
- rozpuszczanie się w żużlu CaO i MgO,

co w efekcie prowadzi do zmian w składzie żużla i metalu. Dalsze reakcje zachodzą w garze WP, kiedy lżejszy żużel pływa na metalu. Reakcje zachodzą na granicy podziału żużel-metal. Opis tych procesów wraz ze skrótowym omówieniem własności, rodzajów i roli żużli w procesie wielkopiecowym podano w części I opracowania.

VI.1. Martwy słup koksu – dead man (MSK)

Przemysł metalurgiczny zużywa olbrzymie ilości energii, w większości jest ona zużywana w procesie wielkopiecowym. Jednymi z najważniejszych czynników wywierających wpływ na zużycie energii są redukcja tlenków żelaza oraz jego nawęglanie. Wiadomym jest, że zachodzi ono dzięki kontaktowi żelaza z koksem i gazem zawierającym węgiel. W strefie kohezji i ściekania tworzą się duże ilości żużla pierwotnego zawierającego jeszcze znaczne ilości tlenków żelaza. Tlenki te są już redukowane w fazie ciekłej, w strefie wytwarzającej wielkiego pieca. Przepływy gazów i ciekłych produktów w strefach ściekania i garu stanowią bardzo złożone zagadnienia. Pola prędkości gazów w strefie ściekania są bardzo niejednostajne, od bardzo dużej prędkości w pobliżu komór spalania do radykalnie obniżonej w strefie martwego słupa koksu. Działanie całego wielkiego pieca zależy bezpośrednio od utrzymania płynnych i stabilnych warunków w strefie ściekania i garu [1-7]. Rysunek 9 przedstawia schematycznie te strefy.

Strefa garu oraz trzon wielkiego pieca są jednym z głównych czynników determinujących nieprzerwany czas pracy wielkiego pieca i jego żywotność. Strefy te są narażone na wiele, negatywnie działających czynników: mechaniczne i chemiczne, zmiany temperatury powodujące negatywne wewnętrzne naprężenia, działanie ciekłego metalu oraz żużla. Procesy zachodzące w garze wielkiego pieca wpływają bezpośrednio na procesy zachodzące w całym agregacie.



Rysunek 9. Schematycznie przedstawione dolne strefy wielkiego pieca.

Wielu badaczy analizuje strefy komór spalania, ściekania i garu wykorzystując różne metody i narzędzia badawcze np.; zimne i gorące modele projektowane w skali laboratoryjnej, wielkości

zmierzone w trakcie rzeczywistej pracy pieca, modelowanie matematyczne oraz analizowanie „rozciętych” zamrożonych wielkich pieców [1].

Strefa ściekania wyznaczona jest przez strefę kohezji, która ją ogranicza od góry, martwy słup koks (MSK) oraz ciekłe produkty (metal, żużel) ograniczające ją od dołu pieca. Poznanie i opisanie mechanizmów zjawisk, które zachodzą w tej strefie, stanowi bardzo ciekawy i trudny temat z punktu widzenia ich wpływu na warunki i wskaźniki operacyjne rzeczywistej pracy wielkich pieców.

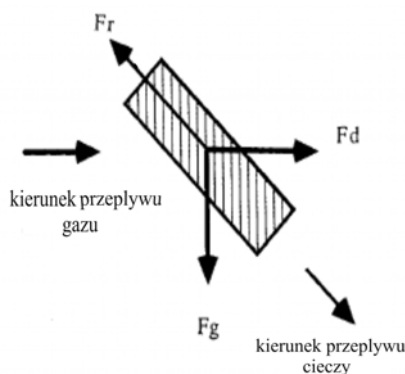
Strefy ściekania i garu w wielkim piecu.

Jednym z ważnych zagadnień w trakcie analizy strefy ściekania i garu, jest zachowanie się MSK oraz koks znajdującego się w garze wielkiego pieca. Ciekłe produkty ściekając przez złoża koks gromadzone są między wolnymi przestrzeniami koks garowego podnosząc stale swój poziom. Przepuszczalność gazu i ciekłych materiałów przez MSK i warstwę koks garowego wywiera bezpośredni wpływ na zdolności produkcyjne wielkiego pieca. Obecnie przy stosowanej technologii wdmuchiwanie pyłu węglowego (PCI), akumulowanie się popiołu oraz nie spalonego pyłu węglowego w MSK jest ściśle związane ze stabilnością operacyjną pieca [2]. Kolejne zagadnienia, mające wpływ na zjawiska zachodzące w strefie ściekania to m.in.: odbudowywanie się MSK w trakcie procesu, jego flotacja (zanurzanie i wypływanie) po powierzchni cieczy (surówki, żużla), jego przepuszczalność dla faz (ciekłych i gazowych) znajdujących się w garze pieca oraz oddziaływanie tych zjawisk i procesów na: parametry liniowe otworu spustowego, rozmiar i kształt strefy ściekania, erozje ścian wyłożenia garu.

Przepływy ciekłych produktów przez strefę ściekania mają charakter: dla układu zwilżanego - przepływu warstwowego wkoło cząstek stałych, dla układu nie zwilżanego – przepływu strumieniowego lub ściekania kropłowego. Dla układu nie zwilżanego przepływ jest traktowany jako faza nieciągła, podlegająca ciągłym przerwaniom i odbudowywaniu strumieni. Siły działające na cylindryczny, ciekły strumień (lub krople) pokazano na rysunku 10.

F_r – efektywny opór tarcia, F_d - siła oporu gazu, F_g - siła ciężkości

Kierunek i wielkość szybkości przesączania jest zdeterminowana przez powyższy bilans.

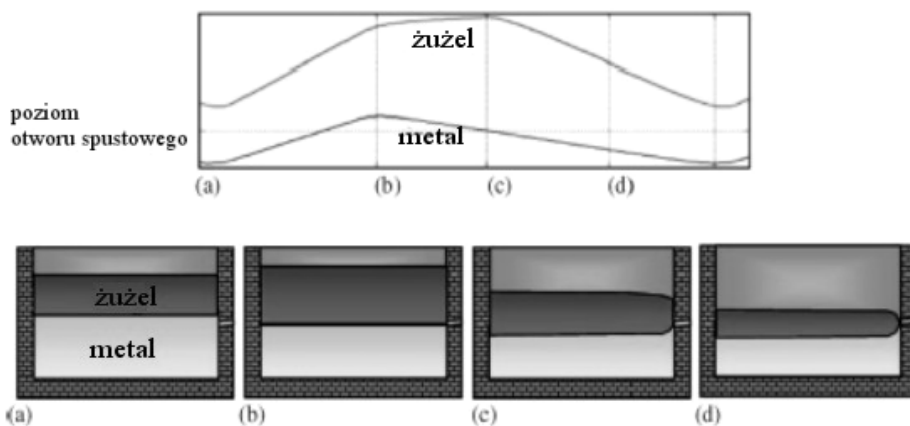


Rysunek 10. Siły działające na przesiąkliwość strumienia cieczy przez złożo.

Autorzy [1] wykonali „zimny” model strefy spalania oraz przepływu cieczy przez złożo upakowane, na podstawie wyników modelowych oraz rozwiązując równania wynikające z prezentowanego bilansu sił, dla danego pola przepływu gazu, własności cieczy, geometrii złoża uzyskano szybkość przesączania się cieczy przez złożo. Stwierdzono również, że opory przepływu gazu mają duży wpływ na rozkład cieczy, przesączającej się w dół pieca. Blisko komory spalania złożo upakowane było suche. Wielkość suchego rejonu zwiększa się ze wzrostem szybkości przepływu gazu. Na podstawie badań wynika, że nie można zaniedbać wpływu oporów gazu na przepływ ciekłego żelaza przez niskie partie pieca.

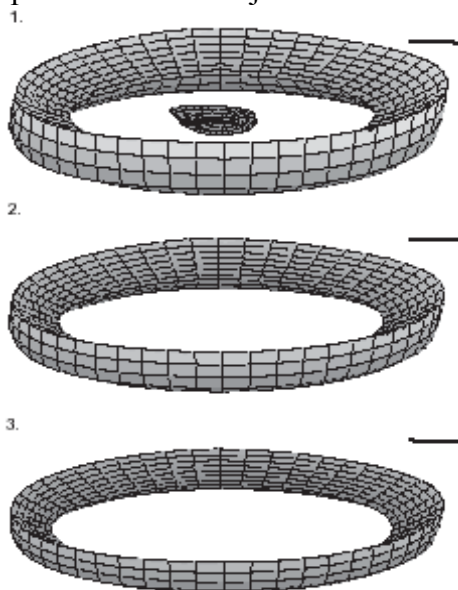
W związku z niemożnością wykonania bezpośrednich pomiarów warunków panujących w garze, takich jak: postęp erozji wyłożenia, poziomów ciekłego żużla i żelaza, warunków przepływu, wolnych przestrzeni, kształtu i miejsca złoża koks w garze, monitorowanie odbywa się za pomocą pomiarów pośrednich. Uzyskano obraz jakościowy, wykorzystując pomiar siły elektromotorycznej.

Mógł on zostać wykonany ze względu na różnice w przewodności elektrycznej materiałów: ciekłego żużla, metalu, wyłożenia węglowego, pancerza pieca. Gromadzenie i zmiany poziomów ciekłych produktów przy typowym cyklu spustowym (dla pieca o jednym otworze spustowym) zostały pokazane na rysunku 11 [3].



Rysunek 11. Zmiany poziomów metalu i żużla w garze pieca w trakcie cyklu spustowego.

J. Brännabacka, H. Saxén [3] podjęli próbę stworzenia modelu matematycznego, który opisywałby, gromadzenie oraz poziomy ciekłych produktów w garze wielkiego pieca. Poziomy ciekłych produktów oraz ich objętości bardzo silnie zależą od wewnętrznej geometrii garu oraz od właściwości MSK. Zmiany geometrii garu w porównaniu do zmian poziomów ciekłych produktów są niewielkie, dlatego zmienna ta posiada dużo mniejsze znaczenie.



Rysunek 12. Trójwymiarowy obraz warstwy wolnego koksu w garze pieca trakcie spustu metalu (w przypadku a, b, c), czarna linia – poziom otworu spustowego.

Dzięki opracowanemu modelowi uzyskano m.in. możliwość monitorowania kształtu i rozmiaru warstwy wolnego koksu podczas cykli spustowych, na rysunku 12, zaprezentowano min. i max. objętość warstwy wolnego koksu. Mechanizm ruchu, MSK wywiera wpływ na warunki panujące w górnej części pieca. Uzyskane wyniki modelowe pokazały, że zmiana spadku ciśnienia gazów w piecu jest silnie zależna od ruchu martwego słupa koksu. Nie jest do końca wiadomym, dlaczego wystąpiła taka zależność, ale możliwymi powodami są: ruch w górnej części MSK deformujący komory spalania (wypiętrzenie „ptasiego gniazda”), oraz „przecinanie” przez koks strefy kohezji, co powoduje zmianę przepuszczalności gazu przez tą warstwę [3].

W związku ze wzrostem w ostatnim czasie ilości wdmuchiwanego pyłu węglowego do wielkiego pieca, właściwości pyłu, kawałków wsadu w niższych częściach pieca (strefa ściekania,

gar) cieszą się naukowym i technicznym zainteresowaniem [6]. W kilku wielkich piecach i symulatorach strefy spalania pobierano próbki warstwy wewnątrz upakowanej (MSK) pozwoliło to na poznanie struktury upakowanej na poziomie dyszy. Mimo, że ruch pyłu w niższych częściach pieca był oszacowany właśnie z tych informacji, to takie próbkowanie odbywało się w momencie dużego zredukowania lub wręcz zatrzymania podawania dmuchu i pyłu węglowego, powoduje to, że pobrane dane są niewystarczające do zrekonstruowania wielowymiarowego przepływu gazów i pyłów w analizowanych strefach [6].

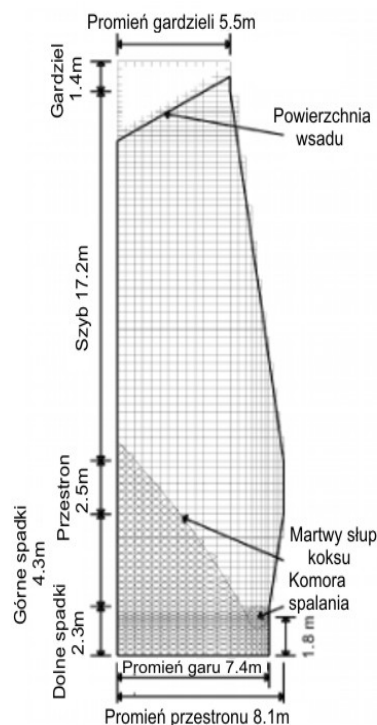
W związku z dużą szybkością i ilością wdmuchiwanego pyłu węglowego, wzrasta nie tylko ilość nie spalonych cząstek pyłu, ale również ilość kawałków koksu końcowego w dolnej części wielkiego pieca. Sadza jest stałą pozostałością po niecałkowitym/lotnym spalaniu sproszkowanego węgla, i jej średnica jest zwykle w obszarze porównywalnym do średnicy cząstki pierwotnej sproszkowanego węgla. Cząstka węgla uwalnia gazowe substancje palne i zmienia swoją strukturę na porowatą podczas niecałkowitego procesu spalania, a ciężar właściwy cząstki sadzy jest generalnie mniejszy. Przeciwnie, drobny koks jest fragmentem załadowanego koksu, i niektóre kawałki mają większą średnicę i gęstość w porównaniu do nie spalonych cząstek sadzy.

Wiadomym jest, że średnica i gęstość cząstki ma duży wpływ na ruch cząstki wprowadzonej (będące w ruchu fluidalnym) - w złożu fluidalne. Przypuszcza się, że cząstki mające różne właściwości wykazują różne charakterystyki przepływu również w wielkim piecu. Zachowanie przepływu pyłu jest jednym z ważnych parametrów w tworzeniu upakowanej struktury, ponieważ część przepływającego pyłu akumulowana jest w martwym słupie koksu. Autorzy wykonali numeryczną symulację przepływu gazów i pyłu, która umożliwia wyjaśnienie zjawiska/wyniku warunku upakowania msk, dla właściwości cząstek znajdujących się w dolnej części wielkiego pieca, zastosowano matematyczny model czterech faz przepływu i wymiany ciepła [6]

Matematyczny model przepływu i wymiany ciepła w piecu traktuje gaz, ciało stałe, płyn i pył jako różne fazy. Model składa się z równań: zachowania masy, pędu i energii cieplnej dla wszystkich rozważanych faz w stanie ustalonym oraz konfiguracji układu osiowoosymetrycznego, wymiany masy, pędu i ciepła pomiędzy różnymi fazami. Model wykorzystuje uproszczone opisy szybkości reakcji, które są określone przez zakres temperaturowy i ograniczenia równowagowe.

Tabela 5. warunki operacyjne użyte w symulacji

Średnica garu	14,8m
Wysokość złoża	27,0m
Ilość dmuchu	8747m ³ /min
Temperatura dmuchu	1177°C
Wzbogacenie tlenem	1,5%
Masa PCI	57,3kg/Mg _{sur}
Masa koksu	450,6 kg/Mg _{sur}
Masa rudy	16000Mg/dzień
Ciśnienie gardzielowe	228kPa

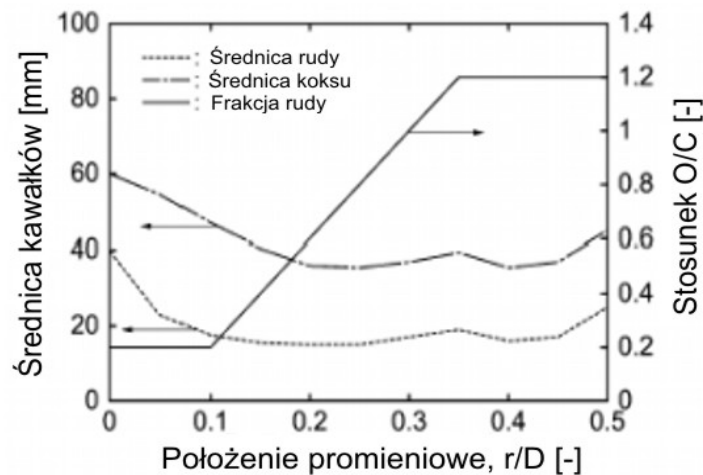


Rysunek 13. Siatka obliczeniowa i geometria pieca.

Model został zastosowany do analizy wielkiego pieca o objętości użytecznej 4907m³ przy dmuchu 8747Nm³/min. oraz produkcji - 2,19 Mg_{sur} m³/d.

Dane eksploatacyjne jako wejściowe do obliczeń modelu zostały przedstawione w tabelicy. Piec był sterowany (prowadzony) z efektywnością redukcji 92,6% z wykorzystaniem tlenku węgla 49,5% i stopniem redukcji bezpośredniej 29,3%. Geometria pieca i siatka obliczeniowa pokazano na rysunku 13.

Stosunek rudy do koksu i średnice tych cząstek na powierzchni zasypanych materiałów wsadowych pokazano na rysunku 14.



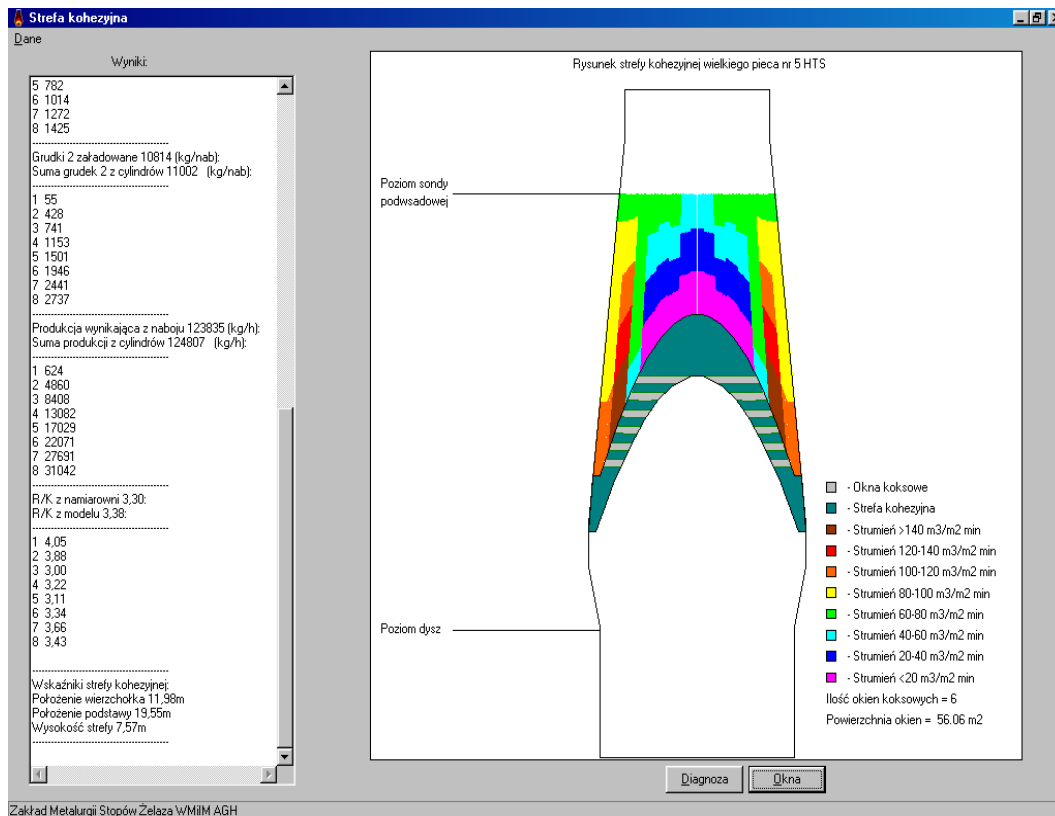
Rysunek 14. Rozkład wsadu.

Na podstawie wykonanych symulacji Autorzy [6] uważają, że gęstość gromadzonego pyłu ma wielki wpływ na jego przepływ, a specjalnie w przypadku większych cząstek. Kiedy średnice tych kawałków stają się większe niż 1,0mm większość zgromadzonych kawałków pyłu porusza się w dół do strefy msk-u wydostając się ze strugi gazu poruszającej się w górę. Taki „wrywający” się pył uważa się za skłonny do akumulowania i pogarszania przepuszczalności msk-u. Tak, więc ważnym jest rozważenie zmniejszenia gromadzenia się drobnego koksu i zwiększenie jego zużycia, aby utrzymać przepuszczalność msk-u.

Wykonane obliczenia numeryczne, pokazują wpływ struktury msk-u i własności gromadzonego pyłu na zachowanie się przepływu gazu i pyłu w dolnej części wielkiego pieca. Serie symulacji matematycznych wykazały, że:

- Pomiedzy własnościami opisującymi strukturę upakowanego złoża msk-u, wolne przestrzenie mają większy wpływ - niż średnica koksu - na penetrację gazem o wysokiej temperaturze i pyłem oraz na spadek ciśnienia w piecu.
- MSK posiadając nadzwyczaj niską ilość wolnych przestrzeni, istnieje możliwość utworzenia strefy niskiej temperatury w martwej strefie koksu. Tak więc, jest bardziej pożądane powstrzymanie akumulowania się pyłu wewnątrz upakowanego złoża msk-u, aby zachować jego przepuszczalność.
- Zwiększenia rozmiaru pyłu oraz zwiększenie ciężaru nie spalonych jego cząstek wykazuje tendencję, do wrywania ich ze strugi gazowej. Uważa się że takie cząstki mają tendencję do łatwej akumulacji w MSK-u. Dlatego też, ogólne zmniejszenie rozmiarów i ciężaru cząstek i wzrost ich zużycia wpływają efektywnie na utrzymanie przepuszczalności MSK-u [6].

Autorzy [4,5] wykonali system ekspertowy pracujący na wielkim piecu nr 5 Huty Mittal Steel Poland oddział w Krakowie, jednym z elementów systemu są: model strefy kohezji oraz model rozkładu strumieni gazów w szybie wielkiego pieca. Rysunek 15 prezentuje przykładową strefę kohezji w wielkim piecu i strumienie gazu przepływające przez szyb pieca.



Rysunek 15. Przykładowa strefa kohezynnej.

Koniecznym jest współpraca modeli opisujących strefę ściekania i garu z modelami charakteryzującymi strefę kohezynnej i przepływu gazu przez strefę kawałkową w wielkim piecu. Zależność między wielkościami charakteryzującymi kształt położenie tych stref wydaje się oczywiste i mające wpływ na prawidłową i stabilną pracę wielkiego pieca.

Możliwości badawcze, zjawisk oraz ich mechanizmów zachodzących w strefach ściekania pracujących wielkich piecach są niewielkie. Dlatego badacze skupiają swoją uwagę na tworzeniu tzw. zimnych modeli oraz na modelowaniu matematycznym. Na podstawie analizy opisanych modeli można stwierdzić:

- poznanie i opisanie procesów zachodzących w strefie ściekania i garu, m.in. takich jak mechanika przepływu wszystkich trzech faz, fizyczne własności tych faz, ich wzajemne zależności stanowi podstawę stabilnej pracy pieca,
- zdefiniowanie mechanizmu zachowania się martwego słupa koks w wielkim piecu jego własności, budowy i ruchu są czynnikami niezbędnymi do opisanie strefy ściekania, jak również do wyjaśnienia mechanizmu erozji wyłożenia w garze wielkiego pieca,
- strefa kohezynna stanowi jeden z warunków brzegowych strefy ściekania, prawidłowe jej zdefiniowanie i opisanie, jest jednym z czynników przy opisywaniu zjawisk zachodzących w strefie ściekania, i garu wielkiego pieca

Dla dokładnego poznania i zdefiniowania opisanych wyżej zjawisk w Katedrze Metalurgii Stopów Żelaza wykonano i zweryfikowano model kohezynnej, parametrów komór spalania i częściowo przepływu gazów przez strefę kohezynnej i ponad nią [5]. Nie rozwiązuje to jednak w sposób zadowalający matematycznego opisu zjawisk w tzw. strefie ściekania w zakresie przeciwnieprądowego ruchu faz ciekłych żużla i metalu w dół pieca i przepływu gazów w górę.

Dlatego prace nad opisem i tworzeniem modeli strefy ściekania będą dalej prowadzone, szczególnie, że rozwój technik badawczych będzie pozwalał na weryfikacje w warunkach rzeczywistej pracy pieca stawianych hipotez.

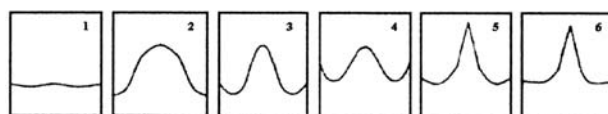
VII. Zastosowanie sieci neuronowych w procesie wielkopieczym na świecie

Działanie i kontrola wielkiego pieca stanowi obecnie duże wyzwanie ze względu na trudność dokonywania niektórych pomiarów, a przecież szybki i dokładny pomiar wszystkich parametrów procesu decyduje o jakości wytworzonego metalu oraz o ekonomii procesu. Pomimo wielkiego postępu nauki nadal nie udało się poznać w całości tak złożonego procesu jakim jest proces wielkopieczowy. Dotyczy to głównie dolnych partii pieca gdzie panują bardzo trudne warunki pracy (wysoka temperatura) wykluczające zainstalowanie odpowiedniej aparatury kontrolno – pomiarowej umożliwiającej lepszą kontrolę stanu jego pracy. Jednak zwiększające się z roku na rok wymagania co do jakości wytworzonego gorącego metalu i minimalizacji kosztów związanych z tym procesem zmuszają inżynierów do opracowywania nowych rozwiązań. Wprowadzenie nowych urządzeń pomiarowych, zastosowanie modeli matematycznych znacznie ułatwiło kontrolę procesu. Natomiast wprowadzenie monitoringu powiększyło możliwości kontroli pracy pieca poprzez bezpośrednią prezentację danych. Jednak nie jest to jeszcze wystarczające. Pogoń za nowymi rozwiązaniami mającymi na celu poprawę i stabilizację procesu wielkopieczowego doprowadziła do wprowadzenia nowej nauki – techniki jaką jest sztuczna inteligencja. Zastosowanie sieci neuronowych do przewidywania anormalnych stanów pieca z niewielkim wyprzedzeniem daje nowe możliwości, a co za tym idzie – spore ożywienie w tak trudnym procesie, jakim jest proces wielkopieczowy.

1) KLASYFIKACJA PROFILI TEMPERATUR PRZY UŻYCIU SIECI NEURONOWEJ

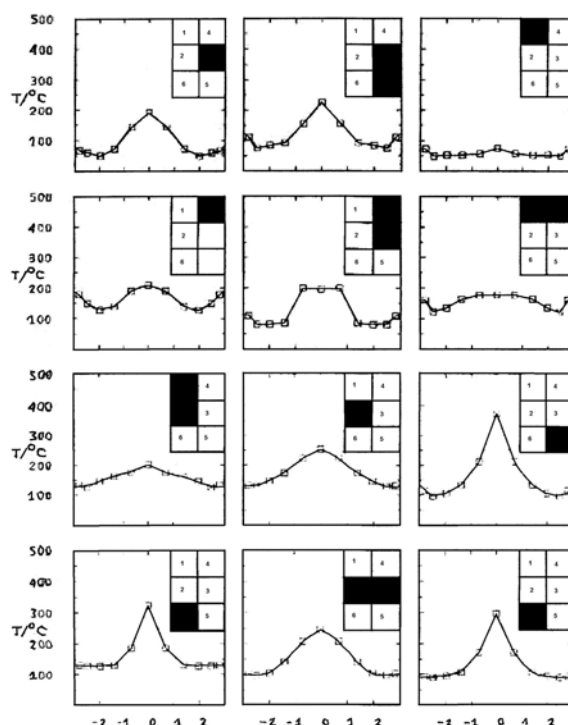
Wysokie temperatury jakie panują wewnątrz pieca, utrudniają bezpośredni pomiar parametrów. Pomimo rozległych badań i prób wykorzystania klasycznych układów automatyki do sterowania procesem, operator nadal opiera się głównie na pomiarach danych wejściowych i wyjściowych podczas kontroli. Ze względu na wysokie temperatury ograniczające możliwości pomiaru parametrów wewnętrznych procesu, sterujący procesem ocenia rozkład materiałów wsadowych i temperaturę kąpieli bazując bardziej na własnym doświadczeniu aniżeli na istniejących modelach. Zatem rozwój metod automatycznej klasyfikacji stał się pożądanym, a pomiary z poziomych sond stały się ważnym elementem, dostarczającym informacji o promieniowym rozkładzie paliwa w szybie pieca. Ponadto odzwierciedlają one rozproszony wsadu i stanu cieplnego strefy kohezyjnej. A w większości hut sygnały z sond zostały wykorzystane do określenia rozdziału strumienia gazu.

Rosnące wymagania wobec jakości surówki zmusiły inżynierów do szukania coraz to nowszych rozwiązań. Okazały się nimi sieci neuronowe o wysokiej jakości rozpoznawania. Z tego względu podjęto się problemu klasyfikacji grupy 11 pomiarów temperatur, otrzymanych przy pomocy poziomej sondy zlokalizowanej powyżej powierzchni wsadu w wielkim piecu w Finlandii [1]. Punkty w sondzie zostały rozmieszczone symetrycznie względem centralnej osi pieca, gdzie promień gardzieli wynosi 2.8 m. Ostatecznie wybrano 6 typowych modeli temperatur. Na rysunku 1 zostały przedstawione profile reprezentowane przez 6 klas.



Rysunek 1. Sześć profili temperatur użytych w klasyfikacji.

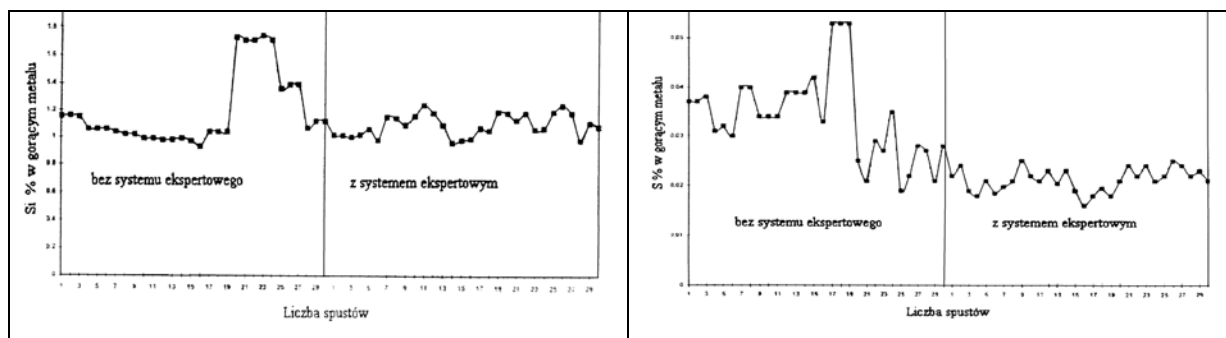
Pierwsza klasa odpowiada anormalnej sytuacji (obniżenie dmuchu, zawisanie wsadu). Druga klasa reprezentuje rzadki stan – może zdarzyć się chwilowo (nieczynna obsługa). Trzeci model opisuje profil z zupełnie wyrównanym rozprawdzeniem gazu (centralny strumień gazu i chwilowo niewielki przepływ wzdłuż ściany pieca zapobiega powstawaniu nawarstwień). Czwarta klasa zgadza się ze stanem pieca z nadmiernym pobocznym przepływem, który może być używany do usuwania nawarstwień ze ścian pieca. Profil piąty ma więcej centralnie przepływającego gazu. Natomiast ostatni profil może być dobrą alternatywą pod warunkiem, że ściany pieca nie są nawarstwione (zmniejszająca się ilość alkaliów). Sztuczna sieć neuronowa została wykorzystana do oceny pracy wielkiego pieca poprzez zaklasyfikowanie do odpowiedniego profilu rozkładu temperatury. Rysunek 2 przedstawia wyniki rozpoznania odpowiedniej klasy stanu pracy wielkiego pieca przy użyciu sieci neuronowej.



Rysunek 2. Dwanaście profili temperatur sklasyfikowanych przy użyciu sieci neuronowej.

2) KONTROLA ZAWARTOŚCI SIARKI I KRZEMU

Kontrola zawartości siarki i krzemu, ich niska zawartość wpływają w znaczny sposób na pomyślność procesu wielkopiecowego. Podstawowy model sieci neuronowej przewiduje wartości składników gorącego metalu, krzemionki oraz wartości temperatur. Model ten łączy się z modelem kalkulacji kosztów wsadu oraz grupą reguł dla zmieniającej się temperatury dmuchu, jej ilości, ciśnienia, ilości koksu i kamienia wapiennego. Model taki sieci współpracującej z systemem ekspertowym został wprowadzony na próbę. Rysunek 3 pokazuje iż niezastosowanie systemu ekspertowego przyniosło całkiem dobre wyniki, ale tylko przez pierwszych 19 spustów. Natomiast z każdym następnym spustem, można było zauważyć wysoki wzrost zawartości krzemu w gorącym metalu. Podczas, gdy zastosowanie systemu nie przyniosło takich niespodzianek.



Rysunek 3. Porównanie zawartości Si i S przed i po zastosowaniu systemu ekspertowego.

Wartości zmierzonych i standardowych odchyłeń dla Si i S przed i po wprowadzeniu systemu ekspertowego współdziałającego z sieciami neuronowymi przedstawia tablica 1. Jak wynika z tabeli, po zastosowaniu systemu ekspertowego współdziałającego z sieciami neuronowymi zawartość Si obniżyła się z 1.195 % do 1.068 %, podczas gdy standardowe odchylenie obniżyło się z 0.258 do 0.073. Znaczną poprawę zanotowano także w przypadku S, o czym świadczy spadek jej zawartości z 0.0318 % do 0.021 %. Przy dłuższym okresie testowania (większym niż 3 miesiące) średnia zawartość Si utrzymywała się na poziomie 1.07 %, podczas gdy średnia zawartość S wyniosła 0.023 %.

Tablica 1. Zawartość Si i S w gorącym metalu [2].

	Zawartość Si, [%]		Zawartość S, [%]	
	Sieć neuronowa bez systemu ekspertowego	Sieć neuronowa wraz z systemem ekspertowym	Sieć neuronowa bez systemu ekspertowego	Sieć neuronowa wraz z systemem ekspertowym
Wartość średnia	1.195	1.068	0.0318	0.021
Odchylenie standardowe	0.258	0.073	0.01	0.0023

W Visakhapatnam Steel Plant na danych operacyjnych z wielkiego pieca nr 1 szkolone i testowane były cztery różne modele sieci neuronowych, a mianowicie: back propagation algorithm (BPA), dynamic learning rate algorithm, functional link network (FLN) oraz fuzjy neural network (FNN). W wyniku przeprowadzonych działań okazało się, że sieci typu FNN mogą przewidywać zawartość masową krzemu w gorącym metalu ze standardowym błędem 0.09 i współczynnikiem korelacji wynoszącym 0.86, natomiast sieci neuronowe typu BPA odpowiednio 0.08 i 0.79. Do modelowania sieci przeznaczone były dane z sześciu miesięcy. Baza danych została podzielona na dwie trzecie do trenowania i jedną trzecią do testowania, w wyniku czego liczba trafnie przewidzianych zawartości krzemu w surówce osiągnęła wartość 86 %. Zawartość krzemu w surówce oraz jej temperatura zależy przede wszystkim od stosunku rudy do koksu w naboju wielopieczowym. W hucie Visakhapatnam Steel Plant wytwarzano surówkę o zawartości 0.5 – 0.8 % krzemu ze średnim zużyciem koksu 510 – 580 kg/Mg sur. Dla porównania w Japonii w korporacji NKK w Fukuyama produkują się surówkę o zawartości krzemu 0.1 %, natomiast w Indiach wielkie piece wytwarzają surówkę o zawartości krzemu 0.4 – 1.9 %.

Szwedzka firma SSAB Lulea Works stworzyła model sieci neuronowej, który był testowany w systemie off – line, a następnie zastosowano go on – line na wielkim piecu nr 2. Sieci neuronowe, które otrzymano miały zdolność uczenia się ze wzorów, będących zbiorem informacji o procesie technologicznym lub modelu matematycznym, który naśladowały. Na

ten zbiór informacji składał się zespół liczb nieliniowych procesu technologicznego, tworzący węzły, które były powiązane ze sobą za pomocą wag połączeń. Wagi te początkowo przyjmowały wartości losowe, a następnie poddawane były procesowi uczenia z wykorzystaniem danych procesu technologicznego. Związek sposobu połączeń węzłów i algorytm uczący określił typ sieci neuronowej. Do tych badań użyta była trzywarstwowa sieć wstecznej propagacji błędu, która składała się z 28 wejść i 1 wyjścia podającego procentową zawartość krzemu w surówce. Algorytm uczący użyty do szkolenia sieci był uogólnioną regułą delty. W trakcie projektowania modelu próbowane były różne struktury sieci, tak aby funkcje w końcu były poprawnie formułowane. Poprzez wybór odpowiedniego numeru podzbioru danych treningowych stare stałe zastępowane były nowymi danymi, w ten sposób model sieci neuronowej mógł być nieprzerwanie aktualizowany, dając zadowalające wyniki z możliwością szybszego tempa zbieżności. Rezultaty stosowania pierwszego modelu w systemie off – line obejmowały pracę pieca poniżej jego normalnych warunków działania. Jeżeli przewidywany błąd był przybliżony do ± 0.05 % zawartości krzemu, to trafienie w przypuszczalną wielkość wynosiło około 85 %. W przypadku kiedy piec był nieznacznie poniżej prawidłowych warunków pracy, to mimo to model mógł przewidywać kierunek zmiany zawartości procentowej krzemu. Zastosowanie modelu sieci neuronowej w systemie on – line do przewidywania zawartości krzemu w surówce dało zadowalające wyniki.

3) KLASYFIKACJA PROFILI PRZEPIYU GAZU WIELKOPIECOWEGO I PRZEWIDYWANIE POŚLIZGÓW

W ostatnim okresie włożono wiele wysiłku w rozwój systemów inteligentnych w wielkopiecownictwie. Liczba wdrażanych systemów ekspertowych do wykrywania i przewidywania anormalnych stanów pieca znacznie wzrosła. Technika sztucznych sieci neuronowych stawała się coraz bardziej atrakcyjniejsza. Mogła być ona bowiem potencjalnym narzędziem do analizy danych i wykrywania wad w procesie. Umiejętność uczenia sieci na przykładach oznaczała, że mogły one automatycznie wyciągać zależności pomiędzy parametrami operacyjnymi a danymi. W 1994 roku w szwedzkiej hucie SSAB Lulea Works przerwano na pewien okres produkcję, ze względu opadania wsadu w dół pieca. Stało się więc koniecznym poczynić odpowiednie środki zaradcze w celu przewidywania nieregularnej pracy agregatu, a tym samym poprawę całego procesu wielkopiecowego.

Istniejące modele matematyczne kalkulacji wsadu oraz bilansu ciepła i masy były bardzo pomocne dla operatorów, ale niewystarczające. Użytkownik dokonywał oceny stanu pieca na podstawie dużej liczby parametrów. Niedopatrzenie ważnego zjawiska mogło kierować do niewłaściwej kontroli. Dlatego wykorzystano sieci neuronowe, które posiadałyby umiejętność odkrywania związków pomiędzy parametrami w procesie z dużą ilością danych. W konsekwencji tego, w szwedzkiej hucie zaprojektowano modele sieci neuronowych do klasyfikacji profilu przepływu gazu wielkopiecowego oraz przewidywania stanu wielkiego pieca.

Klasyfikacja profili przepływu gazu wielkopiecowego

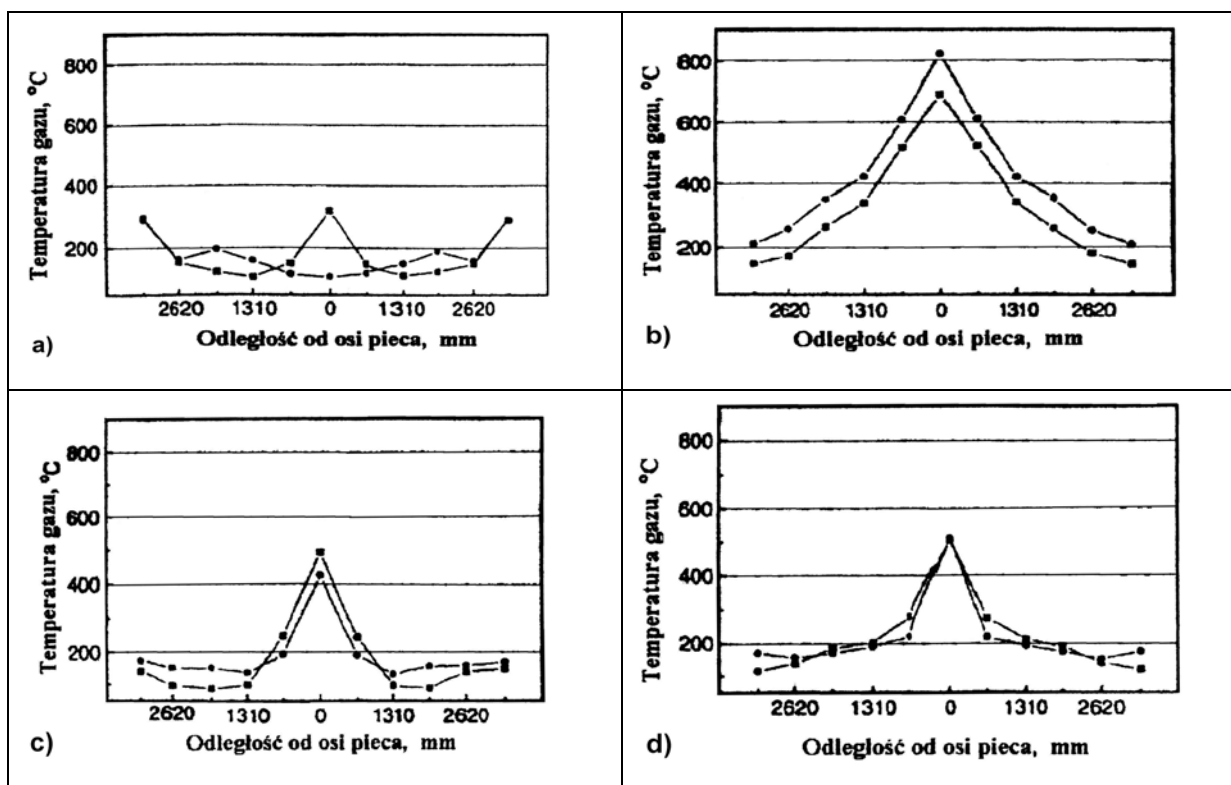
Pomiar temperatury gazu dokonywany był powyżej powierzchni wsadu. Zmierzony profil temperatury odzwierciedlał rozdział wsadu oraz gazu w piecu. Profil przepływu gazu został sklasyfikowany w czterech grupach:

1. Normalnej – przepływ gazu jest odwróconym „V”, zazwyczaj wskazuje to na spodziewany wsad i jednolity rozkład gazu,

2. Prawie normalnej – rozkład przepływu gazu jest rozkładem typu „W” z obniżającą się temperaturą gazu, wskazując na niespodziewany rozkład wsadu,
3. Niewystarczający centralny przepływ gazu typu niski centralny, ale wysoki obrzeżny – temperatury gazu wskazują koniec ładowania wsadu przy centralnej części,
4. Nadmierny centralny przepływ gazu ma bardzo wysoką temperaturę gazu przekraczającą 923 K (650 °C) dający ostrzeżenie zawisania, a w rezultacie poślizgu wsadu.

Kilka prototypów przepływu gazu przedstawiono na rysunku 4. Sztuczna sieć neuronowa została wykorzystana do oceny pracy wielkiego pieca poprzez rozpoznanie typu profilu przepływu gazu oraz odpowiednie zakwalifikowanie go do danej grupy. Sygnałami wejściowymi były temperatury mierzone przez czujniki powyżej powierzchni wsadu. Natomiast warstwa wyjściowa odpowiadała czterem typom profilu przepływu gazu. Testy pokazały, że błąd w klasyfikacji był mniejszy niż 8 %.

Rezultaty pokazały, że w wyniku szkolenia, sieci mogą rozpoznawać różne typy górnych profili przepływu gazu. Klasyfikator składał się z samoorganizującej się cechy mapy sieci, której wektor uczący mógł klasyfikować charakterystyczne wzory rozkładu przepływu ciepła. Model oparty był na sieci wstecznej propagacji i mógł właściwie przepowiadać prawdopodobieństwo nadchodzących zarwań.



Rysunek 4. Prototypy przepływu gazu (a - niewystarczający centralny przepływ gazu, b - nadmierny centralny przepływ gazu, c - prawie normalny przepływ gazu, d - normalny przepływ gazu) [4].

Przewidywanie poślizgów

Poślizg jako nagłe, gwałtowne opadanie wsadu jest zjawiskiem bardzo niekorzystnym podczas procesu. Dlatego zaprojektowano w tym celu odpowiednią sieć neuronową. Z poślizgiem skojarzono 10 zmiennych, które zostały użyte jako dane wejściowe. Do nich należały:

1. Temperatura gazu wielkopieczowego,
2. Zmiana temperatury gazu wielkopieczowego po 3 godzinach,
3. Skład chemiczny gazu wielkopieczowego,
4. Zmiana składu chemicznego gazu wielkopieczowego po 3 godzinach,
5. Wskaźnik przepuszczalności wsadu w piecu,
6. Średnia ważona 4 najniższych temperatur wśród 8 pomiarów przy ścianie,
7. Model rozkładu przepływu ciepłego,
8. Najniższa wartość przepływu ciepłego przez trzy niższe warstwy chłodnicy płytowej,
9. Standardowe odchylenie ciśnienia dmuchu po 3 godzinach,
10. Szybkość wsadu.

Dla określenia przewidywanego poślizgu uwzględnione zostały różne kombinacje z 10-ciu przedstawionych zmiennych, służące jako dane wejściowe do modelu sieci. Rezultaty pokazały, że użycie pięciu zmiennych (2, 4, 6, 7, 10) umożliwia przewidywanie poślizgów z 3 godzinnym wyprzedzeniem. Zmniejszenie tej liczby zmiennych mogłoby być przyczyną zbyt mocnej lub zbyt słabej reakcji sieci, podczas gdy zwiększenie liczby zmiennych mogłoby nieznacznie poprawić dokładność przewidywania. Dlatego uznano te 5 zmiennych za bardzo ważne parametry. Dla przykładu można podać, iż użycie 4 zmiennych (2 lub 4; 5 lub 9; 6 lub 7; 10) sieci dawało wiele nieuzasadnionych alarmów przesunięcia wsadu. Ta sytuacja wskazuje na to, iż redukcja zmiennych może przynieść jedynie niekorzystny efekt, jeśli chodzi o dokładność przewidywania. Doświadczenia te wskazują, że zmiany w temperaturze gazu gardzielowego, składu chemicznego i szybkości opadania wsadu są najważniejszymi parametrami dla przewidywania poślizgów.

System nadzoru przez sieci neuronowe został zaprojektowany dla klasyfikacji profilu przepływu gazu gardzielowego, modeli rozdziału strumienia ciepłego i do przewidywania zbliżających się poślizgów. Podczas okresów działania system musiał wysyłać rozpoznane i przewidywane wartości co 30 minut. Kiedy przewidywane prawdopodobieństwo poślizgu było większe niż 0.5 system musiał zdawać raporty po krótszym czasie. Osadzona funkcja alarmu dotycząca błędów dawała ostrzeżenie w odniesieniu do nieregularności modeli profilu przepływu gazu wielkopieczowego, rozdziału strumienia ciepłego oraz poślizgów.

4) PODSUMOWANIE

Dzięki działającym systemom kontroli i regulacji uzyskuje się zarówno znaczne oszczędności ekonomiczne, polegające na obniżeniu kosztów produkcji, jak i udaje się poprzez lepszy wgląd w wewnętrzne procesy zachodzące w piecu osiągnąć większą stabilizację biegu agregatu, a tym samym ujednorodnić parametry surówki i żuźla. Systemy te gorzej sprawują się w sytuacjach występowania zakłóceń lub znacznych zmian parametrów pracy. Szczególnie chodzi tu o dokładność przewidywania wartości parametrów. W takim przypadku stosuje się najczęściej metody statystyczne, których najbardziej rozwiniętą formą są sieci neuronowe. Mogą one pracować samodzielnie i w wielu przypadkach z dobrym skutkiem przewidzieć rozwiązanie, co z reguły nie udaje się modelom tradycyjnym. Z analizy przedstawionych modeli oraz dostępnych danych można stwierdzić, iż:

1. sieć neuronowa posiada zdolność automatycznego określania zależności pomiędzy danymi wejściowymi a wyjściowymi,

2. ważniejsze parametry procesu mogą być przewidywane z pewnym wyprzedzeniem (2 – 3 godziny), co w perspektywie czasu produkcyjnego (1 spust) może mieć duże znaczenie dla procesu,
3. sieć neuronowa umożliwia dokonanie pomiaru składu i ilości gorącego metalu i żużła on – line bez konieczności stosowania techniki spektrograficznej, wykonywanej tylko off – line,

Tak więc wydaje się, że udział modeli sieci neuronowych w systemach kontrolno – sterujących wspomagających pracę wielkich pieców jest uzasadniony. Modele te mogą pracować samodzielnie (jak w przytoczonych przypadkach), mogą również niejako dublować rozwiązanie oparte na opisie zjawisk fizycznych i potwierdzać je lub negować. Jednak wymaga to w przyszłości wiele pracy i doświadczeń, żeby móc opisać szczegółowo tak skomplikowany pracujący agregat jakim jest wielki piec przez sieci neuronowe.