



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 I PODSTAWY STEROWANIA PROCESAMI REDUKCJI

/do użytku wewnętrznego AGH/

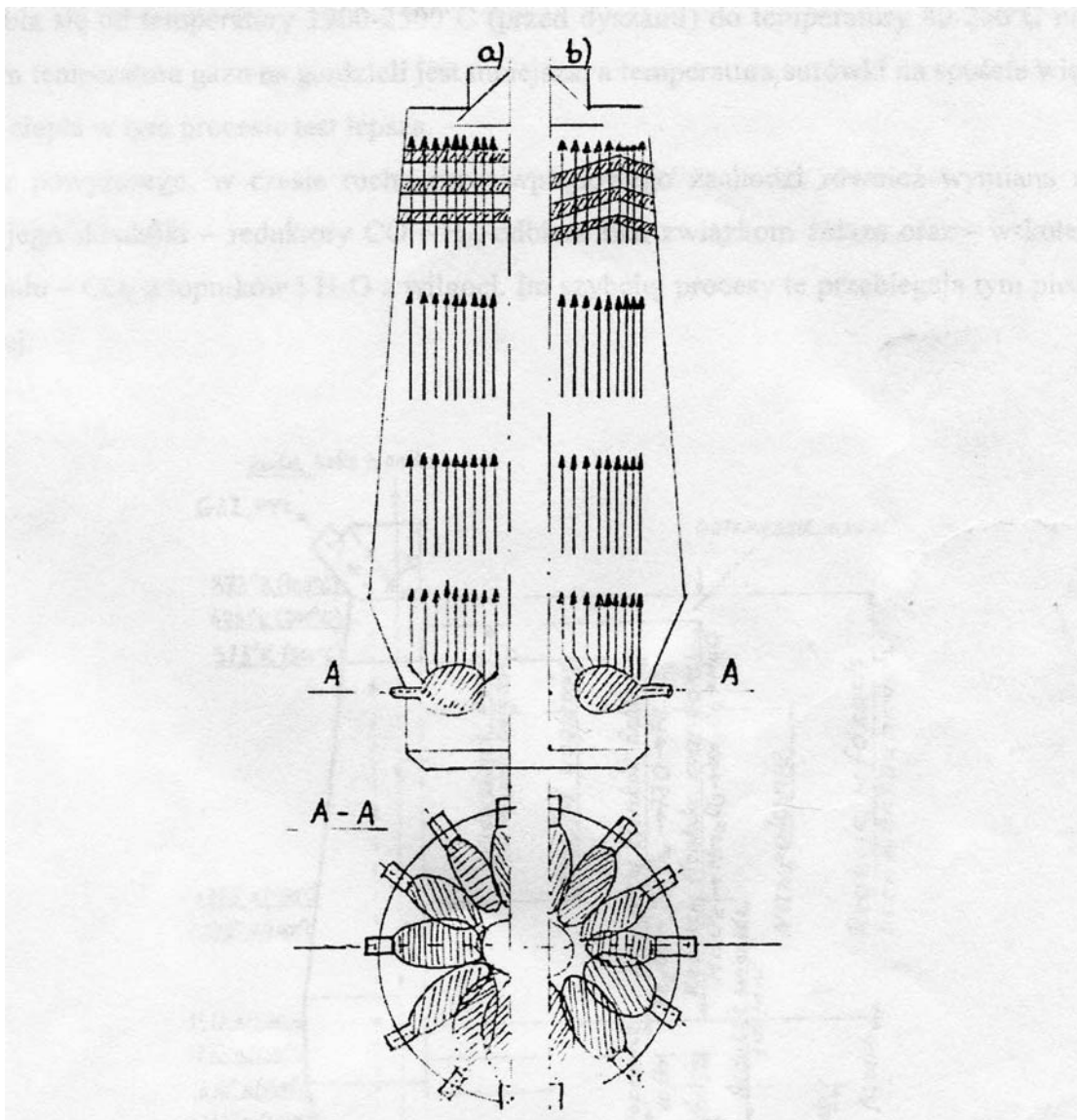
Studia inżynierskie, Semestr VII

Proces wielkopiecowy – procesy redukcji

I. Zasada pracy wielkiego pieca.

Wielki piec należy do grupy pieców szybowych, których proces technologiczny odbywa się w tzw. przeciwprądzie. Przeciwprądowa zasada pracy wielkiego pieca sprowadza się do ruchu w przeciwnych kierunkach a to:

- Wsadu – z góry pieca w jego dół;
- Gazu – z dołu pieca (od dysz) do jego góry



Rys. 1. Przepływ gazu przez wielki piec

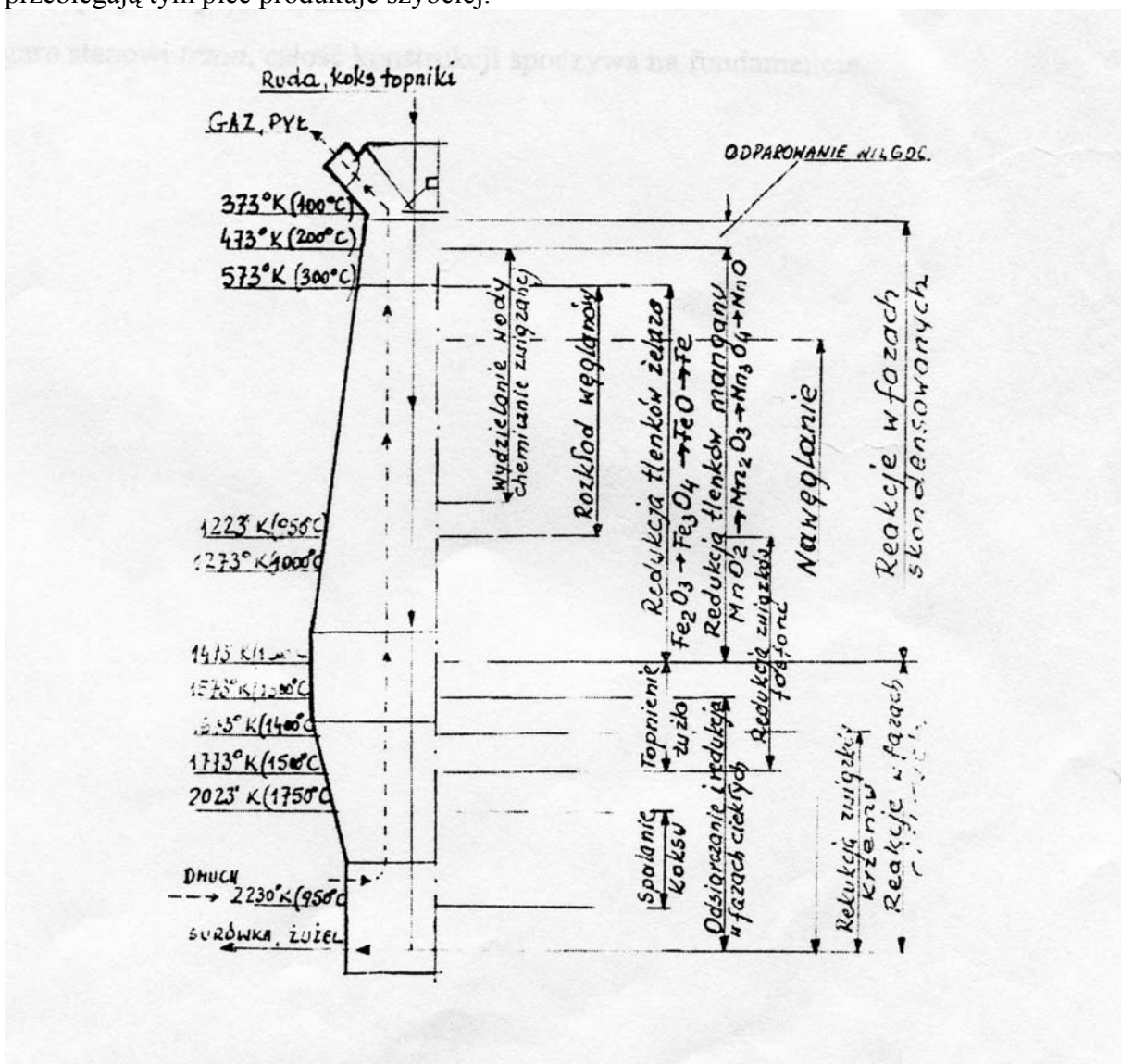
Wsad ładowany jest urządzeniem zasypowym do gardzieli (górnicy pieca). Wsad ten składa się z materiałów żelazodajnych, koksu i ewentualnie topników.

Dmuch (obecnie gorący) wdmuchiwany jest do pieca w jego dole (prawie górny poziomy gar) przez dysze, przed którymi spala się przemieszczający z góry koks.

To palenie się koksu oraz topienie wsadu na surówkę i żużel, a także wypuszczanie z pieca płynnych produktów wytopu powoduje zwalnianie się (opróżnianie) pewnej objętości pieca, czyli możliwość obniżania się wsadu („schodzenie” wsadu) w dół.

Dmucha przed dyszami spala koks, następuje redukcja powstałego CO_2 w CO , i powstały gaz porusza się do góry pieca. Zatem jednocześnie gaz przepływa do góry pieca, a wsad schodzi w dół (przeciwprąd). Podczas tego wzajemnego przemieszczania wsad pobiera ciepło od gazu i tym samym ogrzewając się aż do temperatury płynnych produktów wytopu. W tym czasie gaz przekazując ciepło wsadowi oziębia się od temperatury $1900\text{--}2500^\circ\text{C}$ (przed dyszami) do temperatury $80\text{--}250^\circ\text{C}$ w gardzieli pieca. Im temperatura gazu na gardzieli jest mniejsza, a temperatura surówki na spuście większa, tym wymiana ciepła w tym procesie jest lepsza.

Oprócz powyższego, w czasie ruchu przeciwprądowego zachodzi również wymiana masy. Gaz, a ściślej jego składniki – reduktory CO i H_2 , odbierają tlen związków żelaza oraz – wskutek nagrzewania wsadu – CO_2 z topników i H_2O z wilgoci. Im szybciej procesy te przebiegają tym piec produkuje szybciej.



Rys.2. Reakcje fizykochemiczne zachodzące w wielkim piecu.

II. Profil wielkiego pieca i jego uzasadnienie kształtu.

Częściami wielkiego pieca w jego zamkniętej objętości są gardziel, szyb, przestron, spadki i gar. Ich geometria jest następująca:

- a. gardziel ma kształt walca, kształt ten sprzyja symetryczności ułożenia wsadu przy załadunku;
- b. szyb ma kształt ściętego stożka, uwzględnia to zwiększenie objętości materiałów wsadowych wskutek ich nagrzewania podczas schodzenia w dół pieca;
- c. przestron ma kształt walca, ponieważ materiały się nie rozszerzają przechodząc w stan plastyczny i płynny. Brak zmian objętości, a raczej skurcz, jest spowodowany zajmowaniem wolnych przestrzeni między kawałkami wsadu przez ciecz,
- d. spadki mają kształt odwróconego stożka ściętego – ułatwia to spływanie płynnych produktów do garu;
- e. gar ma kształt walca i służy do magazynowania płynnych produktów wytopu w okresach pomiędzy kolejnymi spustami.

Dno garu stanowi trzon, całość konstrukcji spoczywa na fundamencie.

W dalszej części niniejszego rozdziału przedstawiono na przekrojach profile różnych wielkich pieców na świecie.

III. Urządzenia zasypowe wielkiego pieca.

III.1. Rozkład materiałów wsadowych w gardzieli pieca.

Rozpatrując kolejno przyczyny decydujące o rozkładzie materiałów wsadowych w gardzieli wielkiego pieca można ustalić wytyczne, pozwalające na wykorzystanie wszystkich dostępnych czynników zwiększających równomierność rozkładu strumienia gazów na całym przekroju poziomym gardzieli. Czynnikiemami tymi są:

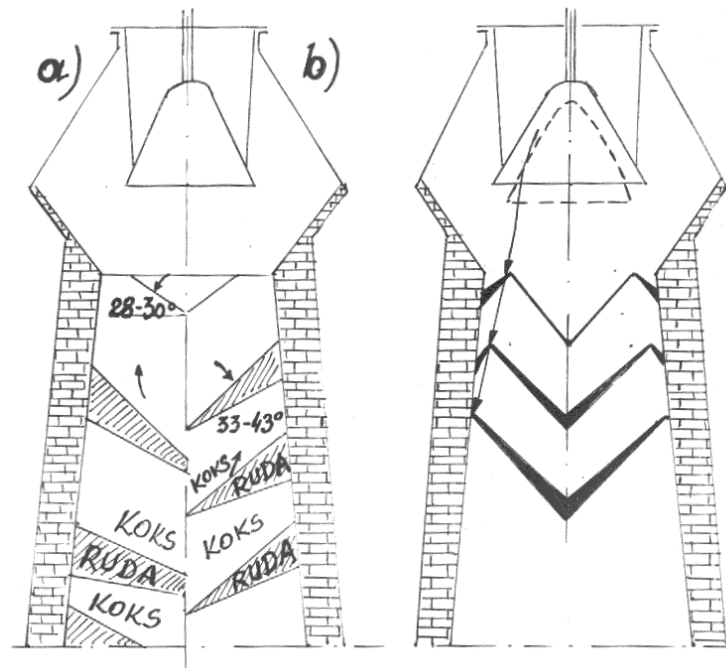
- a) konstrukcja urządzenia zasypowego;
- b) naturalne własności materiałów wsadowych i występujące w nich pod tym względem różnice;
- c) tzw. parametry zasypu, pozwalające na regulowanie rozkładu tworzyw w gardzieli, a tym samym na kontrolowane regulowanie związanych z tym wskaźników przewodności słupa wsadu.

Z uwagi na to, że wsad przerabiany w wielkim piecu jest doń zasypywany w nabojach dwojakiego rodzaju (nabój – to ilość materiału zasypywanego jednorazowo do pieca przy każdorazowym opuszczaniu dużego stożka zasypowego przy zasypie stożkowym lub wypróżnienie w czasie cyklu zbiornika przy zasypie bezstożkowym – w naboju rudnym, złożonym z tworzyw żelazodajnych i topników, oraz w naboju koksowym – pomiędzy warstwami stworzonymi przez te naboje w gardzieli wielkiego pieca występują dość znaczne różnice w ich rozłożeniu na przekroju pieca. Nabój rudny rozkłada się grubszą warstwą przy ścianach w strefie wierzchołkowej, nabój zaś koksowy większą wysokością warstwy wypełnia przestrzeń osiową wielkiego pieca. Taki rozkład tych materiałów jest zgodny z założonym zróżnicowaniem przewodności słupa wsadu, gdyż nabój koksowy ze względu na naturalne własności tego paliwa (m.in. jego porowatość) stawia mniejszy opór strumieniowi przepływających gazów.

Różnice pomiędzy naturalnymi kątami zsypania stwarzają dodatkowe możliwości regulacji rozkładu gazów na przekroju pieca przez *dobór wielkości naboju koksowego* i związaną z nią wielkość naboju rudnego. Koks ma mniejszy kąt zsypania naturalnego niż materiały z naboju rudnego, toteż powierzchnie warstw obu tych składników wsadu nie są do siebie równoległe. Dla koksu wielkopieczowego kąt naturalnego zsypania wynosi 28-30°, natomiast dla tworzyw rudnych waha się w dość szerokich granicach 33-43°, zależnie od gatunku i wielkości ziaren. Wskutek tego, zależnie od doboru wielkości naboju i związanej z tym grubości warstwy danego tworzywa, można zwiększyć lub ograniczyć różnice przewodności na przekroju gardzieli (rys. 8). Gdy nabój jest zbyt mały, warstwa koksu przy ścianach jest stosunkowo niewielka, zaś w osi pieca brak prawie zupełnie tworzyw rudnych. Jeśli natomiast nabój jest bardzo duży, warstwy obydwu tworzyw osiągają znaczne grubości, i to sięgające do samej osi pieca. W pierwszym przypadku (rys. 8b) strumień gazu będzie wykazywał tendencje przepływu głównie w osi pieca, czyli otrzymuje się wybitnie osiowy (środkowy) bieg pieca ze wszystkimi jego ujemnymi skutkami w postaci zmniejszonej produkcji i niewłaściwego składu wytapianej surówki. W przypadku drugim (rys. 8a), tj. przy stosowaniu dużych naboju, naturalna tendencja gazów do wznoszenia się w pobliżu ścian pieca, gdzie wskutek pochylenia tych ścian ruda jest spulchniona, nie jest kompensowana zróżnicowanym oporem na przekroju pieca. Ułatwienie przepływu gazów przy ścianach pociąga za sobą tzw. obrzeżny bieg pieca, a w osi pieca tworzy się słup nie dość nagranych materiałów, co wpływa również bardzo niekorzystnie na bieg pieca.

Na rozkład materiałów w gardzieli wielkiego pieca można jeszcze wpływać przez *zmianę głębokości zasypu*. Przez to pojęcie rozumie się różnicę poziomów, jaka występuje w piecu między podstawą opuszczonego stożka dużego a górną powierzchnią materiałów już zasypanych do pieca. Normalnie zasypywanie odbywa się na niewielką głębokość, ok. 1,2-1,4

m, tj. równą podwójnemu skokowi dużego stożka przy zasypie stożkowym.. Do takiej właśnie normalnej głębokości zasypu odnosiły się omówione już przypadki. Rozkład materiałów ulega jednak radykalnej zmianie, jeżeli ładuje się je do pieca na większą głębokość. Przypadek taki pokazano schematycznie na rys.9.



Rys.8. (z lewej). Wpływ wielkości nabojów na rozkład materiałów wsadowych na przekroju pionowym gardzieli wielkiego pieca.

a – rozkład przy nabojach zwiększonych, b – rozkład przy nabojach zmniejszonych w stosunku do naboju o optymalnej wielkości

Rys.9. (z prawej). Wpływ głębokości zasypu na rozkład materiałów wsadowych na przekroju gardzieli wielkiego pieca (grubością linii zaznaczono zwiększającą się koncentrację wsadu gruboziarnistego, tj. większych kawałków)

Jak widać, w miarę zwiększenia wysokości zasypu wierzchołek usypywanego stożka zbliża się coraz bardziej do ściany pieca. Wynika z tego, że dla uzyskania prawidłowego rozkładu materiałów w gardzieli trzeba określić optymalną głębokość ich zasypywania, a powierzchnię zasypanych tworzyw utrzymywać na stałym poziomie. Pozostaje on w ścisłym związku ze średnicą dużego stożka; im większa jest ta średnica, tym z mniejszej wysokości należy zasypywać naboje. Obniżając poziom zasypu należy jednak pamiętać, że wskutek tego zmniejszy się musi wysokość użyteczna pieca, a tym samym droga przepływu gazów i czas ich zetknięcia z materiałami wsadowymi. Pociąga to oczywiście za sobą obniżenie stopnia wykorzystania ciepłego i chemicznego tych gazów.

Niezależnie od już przytoczonych czynników można jeszcze regulować bieg pieca przez właściwy *dobór kolejności zasypywania* nabojów. Zasypując koks i rudę (spiek) jednocześnie, można uzyskać różne efekty zależnie od tego, co będzie zasypywane na duży stożek jako pierwsze lub co z rynny zasypowej pójdzie pierwsze. Wybór najkorzystniejszego systemu dla danego pieca najlepiej określić w praktyce przez stosowanie różnych kombinacji przy równoczesnej kontroli temperatury i składu gaz – parametrów charakteryzujących bieg pieca. Ogólne zasady są następujące:

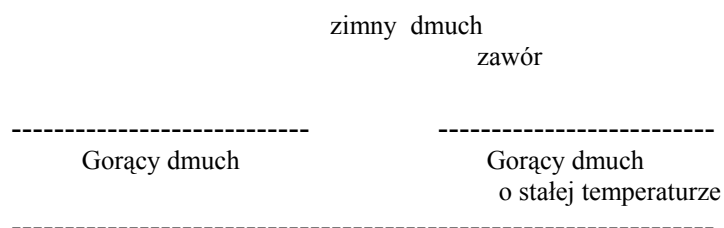
- przy zasypywaniu rudy (*R*) bezpośrednio po zasypaniu koksu (*K*), czyli przy oddzielnym zasypywaniu typu *KKK/RRR* uzyskuje się warunki sprzyjające biegowi obrzeżnemu;
- podobne tendencje występują przy jednoczesnym zasypywaniu typu *KKKRRR/*, tzn. z załadowaniem na dno misy koksu, a na wierzchu rudy;
- natomiast przy jednoczesnym zasypywaniu typu *RRRKKK/*, tj. ruda na dnie, a koks na wierzchu, stwarza się warunki korzystne dla biegu osiowego.

Można również stosować pośrednie typy zasypywania – np. *KRRKKR/* lub *KKRRKR/* - uzyskując dzięki temu pośredni przepływ gazów między dwoma skrajnymi przypadkami. W przypadku stosowania zasypu bezstożkowego z rynną zasypową nie ulegają zmianie powyższe zasady, ale elastyczność, szybkość i skuteczność ich stosowania jest o wiele lepsza.

IV. Nagrzewanie dmuchu i podanie go do pieca.

Zimny dmuch jest tłoczony rurociągami zimnego dmuchu z siłowni przez turbodmuchawy. Ciśnienie jego wynosi od 1,5 do 5,5 atm w zależności od wielkości wielkiego pieca (objętości od 1000 do 5500 m³). Następnie jest nagrzewany w urządzeniach zwanych nagrzewnicami. Najpopularniejsze z nich to nagrzewnice typu Cowpera z wewnętrznymi szybem spalania lub nowsze Dideera z zewnętrznym szybem spalania. W nagrzewnicach powietrze ogrzewa się do temperatur rzędu 800-1350°C. Zwykle piec posiada 3 lub 4 nagrzewnice, z których 1-a lub 2-e są opalane gazem (spala się w szybie spalania). Powstające spaliny przechodzą przez kratownicę złożonej z materiałów ogniotrwałych. W kratownicy spaliny oddają ciepło, które jest akumulowane. Następnie spaliny wychodzą do komina. W nowych rozwiązaniach instalowane są urządzenia do odzysku ciepła spalin (wykorzystywane jest do produkcji ciepłej wody) i urządzenia odsiarczające.

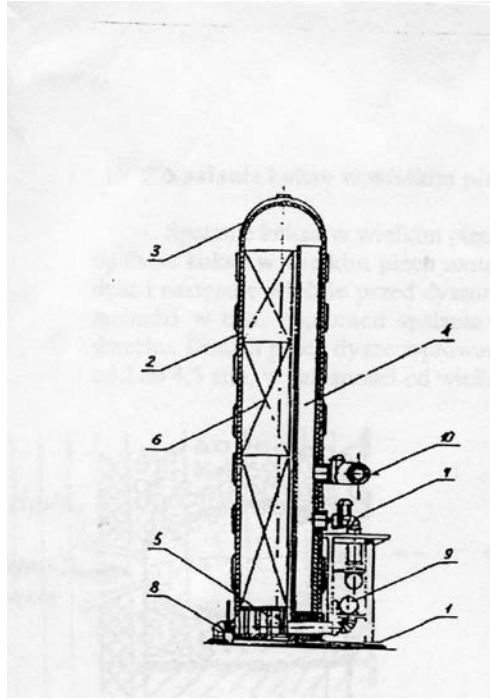
Po nagraniu kratownicy do tem. rzędu 900-1500°C kończy się opalanie i w drugim cyklu przepuszcza się powietrze zimne (dmuch zimny) przez kratownicę, czyli wytwarza się gorący dmuch. Stałość jego temperatury w całałym cyklu ogrzewania dmuchu jest zapewniona poprzez dopust zimnego powietrza zaworem motylkowym sterowanym automatycznie.



Następnie dmuch jest przesyłany do okrężnicy czyli przewodu opasującego cały wielki piec na poziomie spadków.

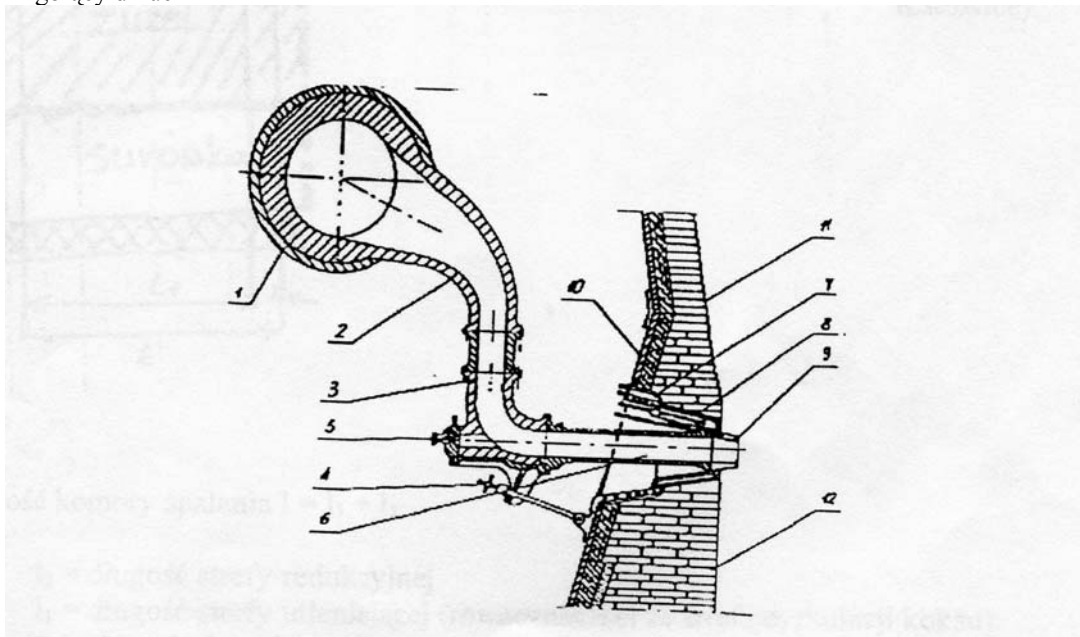
Z okrężnicy dmuch jest rozdzielany do zestawów dyszowych, którymi doprowadzany jest do pieca. Ilość dysz (zestawów dyszowych) jest tym większa im większy jest wielki piec, czyli im większa jest średnica garu. Zakończeniem zestawu dyszowego jest miedziana dysza chłodzona intensywnie wodą. Przez tą dyszę dmuch gorący jest wprowadzony do pieca pod ciśnieniem od 1,5 do 5,5 atm, przez co ma dużą szybkość (130-250 m/sek) i energię kinetyczną.

Na kolejnych rysunkach przedstawiono nagrzewnicę typu Coopera i typowy zestaw dyszowy do podawania dmuchu do wielkiego pieca. Szczegółowo zagadnienia te wraz z innymi typami nagrzewnic i zestawów dyszowych są tematem seminariów.



Rys.10. Nagrzewnica Coopera (zw. Kauperem) dla podgrzewania dmuchu:

1 – fundament, 2 – płaszcze nagrzewnicy z wyłożeniem ogniotrwałym, 4 – szyb spalania, 5 – kolumny podtrzymujące kratę, 6 – wielokanałowa kratownica z szamoty, 7 – przewód i palnik gazowy, 8 – odprowadzenie spalin, 9 – przewód doprowadzający zimny dmuch, 10 – przewód odprowadzający gorący dmuch



Rys.11. Przewody doprowadzające dmuch do wielkiego pieca:

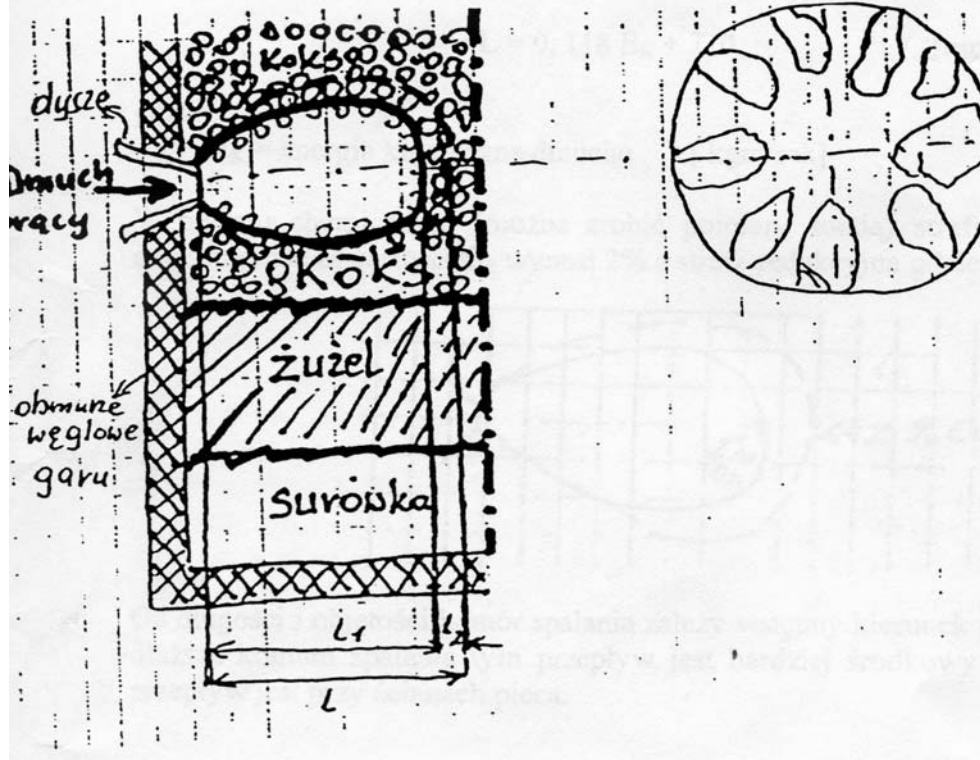
1 – okrężnica dmuchu (przewód zbiorczy), 2 – kolano stałe z króćcem wylotowym z okrężnicy, 3 – kolano ruchome dyszowe (połączone przegubowo), 4 – ciągnio sprężynowe dla połączenia kolana z dyszakiem, 5 – wziernik z pokrywą wziernikową, 6 – dyszak zwykły lub izolowany (azbestem), 7 – obsada dyszownicy z rurkami dla chłodzenia wodnego, 8 – dyszownica (z brązu) z chłodzeniem wodnym, 9 – miedziana dysza z chłodzeniem wodnym, 10 – pancerz garu z ramami stalowymi dla osadzenia obsad dyszownic, 11 – ogniotrwałe obmurze szamotowe spadków, 12 – ogniotrwałe obmurze garu (na poziomie dysz – szamotowe, a poniżej – węglowe).

UWAGA! a). przewody wymienione pod poz 1-3 są wyłożone kształtkami szamotowymi; b). części wymienione pod poz. 7-9 stanowią tzw. Zestaw dyszowy.

V. Spalanie koksu w wielkim piecu.

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. Dmuch 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).



Rys. 12 (po lewej) Przekrój pojedynczej komory spalania.

Rys.13 (po prawej) Przekrój garu w strefie dysz.

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:

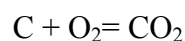
l_2 = długość strefy redukcyjnej

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

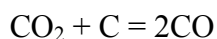
Długość i objętość komór spalania zależy od energii kinetycznej dmuchu oraz własności fizycznych koksu. Te własności koksu to: reakcyjność, kawałkowość, porowatość, zawartość węgla.

Reakcja spalania koksu przed dyszami przebiega w dwu etapach.

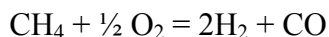
W pierwszym etapie przy wylocie dyszy znajduje się strefa utleniająca (l_1) prawie równoznaczna ze strefą cyrkulacji koksu. W tej strefie tlen dmuchu zostaje zużyty na powierzchniowe spalanie kawałków koksu w myśl reakcji:



W drugim etapie w tzw strefie redukcyjnej (l_2) 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.

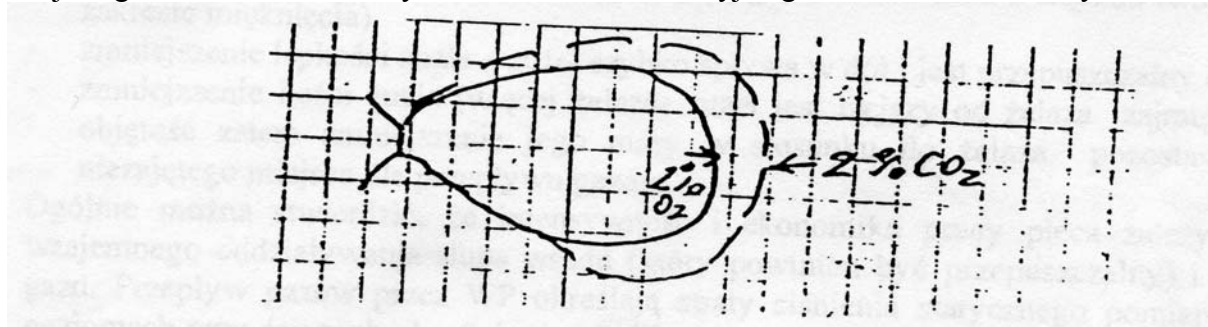
Chodak podał wzór na długość komory spalania:

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

gdzie:

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

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%.



Rys.14. Chemiczny podział komory spalania.

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.

VI. Przepływ gazów przez wielki piec.

Po opuszczeniu strefy dysz gazy powstałe w komorach spalania przemieszczają się w górę pieca. Naturalną tendencją gazów jest ich przepływ przy ścianach ze względu na mniejsze opory spowodowane rozluźnieniem wsadu ze względu na rozszerzenie się w dole szybu wielkiego pieca. Ta tendencja może być zniwelowana wydłużeniem komór spalania i np. zasypaniem mniej przewiewnej od koksu rudy przy ścianie. Ogólnie można stwierdzić, że gazy płyną zawsze tam gdzie są mniejsze opory przepływu.

W strefie ponad dyszami (spadki, przestron) gdzie oprócz koksu stałego inne tworzywa są w postaci płynnego żelazistego żużla lub kropel metalu, przepływ gazów zależy od:

- ziarnistości koksu – (mała i nierównomierna ziarnistość zawęży wolne przestrzenie służące do spływania żużla do garu i jednoczesnego przepływu gazów w górę pieca),
- lepkości żużla (im gęstszy żużel tym wolniej ścieka i jest mniej przepuszczalny dla gazów poruszających się w górę),
- ilości żużla (im większa masa spływającego w dół żużla tym mniej miejsca – w wolnych przestrzeniach pomiędzy kawałkami koksu – do przepływu w górę pieca gazów).

W strefie tzw. kohezji – mięknięcia materiałów – warstwa plastyczna jest prawie nieprzepuszczalna dla gazów i gaz może wydobywać się z tej strefy jedynie oknami koksowymi. Jest to strefa najbardziej nieprzepuszczalna i im grubsza (zależy od stopnia przygotowania wsadu) tym przepływ gazów w górę pieca jest mniejszy i bardziej nieregularny.

W strefie materiałów stałych przepływ gazów uwarunkowany jest składem ziarnowym i ułożeniem materiałów w gardzieli pieca. Im równiejszy skład ziarnowy tym większe średnice hydrauliczne (wolne przestrzenie pomiędzy kawałkami wszystkich tworzyw) i tym lepszy (łatwiejszy) przepływ gazów.

Generalną zasadą aerodynamiki przepływu gazów przez wielki piec w przeciwnym kierunku do wsadu jest jego równomierny przepływ na każdym przekroju i każdej wysokości pieca. Zapewnia to równomierne obmywanie wszystkich kawałków wsadu a przez to, szybką wymianę ciepła (gaz przekazuje ciepło wsadowi) i masy (gaz odbiera tlen z tlenków żelaza i innych metali).

Ten równomierny (lub lekko nierównomierny ale ściśle kontrolowany i zamierzony) przepływ gazu osiąga się przez:

- urównomiernienie składu ziarnowego wsadu (odsiewane przed załadunkiem do pieca), przez co średnice wolnych przestrzeni są największe,
- zmniejszenie grubości strefy mięknięcia (przygotowanie wsadu o wąskim temperaturowo zakresie mięknięcia),
- zmniejszenie lepkości żużla – żużel szybko spływa w dół i jest przepuszczalny dla gazów,
- zmniejszenie ilości żużla (więcej żelaza) żużel jest lżejszy od żelaza zajmuje większą objętość zatem zmniejszenie jego masy w stosunku do żelaza pozostawia więcej niezajętego miejsca dla przepływu gazów.

Ogólnie można stwierdzić, że intensywność i ekonomika pracy pieca zależy m.in. od wzajemnego oddziaływania słupa wsadu (który powinien być przepuszczalny) i strumienia gazu. Przepływ gazów przez WP określają straty ciśnienia statycznego pomiaru na kilku poziomach przy ścianach określające największe straty ciśnienia a zatem i opory przepływu. Ponadto gaz podtrzymuje 50-60% masy wsadu wpływając na zmniejszenie tarcia wsadu o wsad a przez to na mniejsze wydmuchy pyłu.

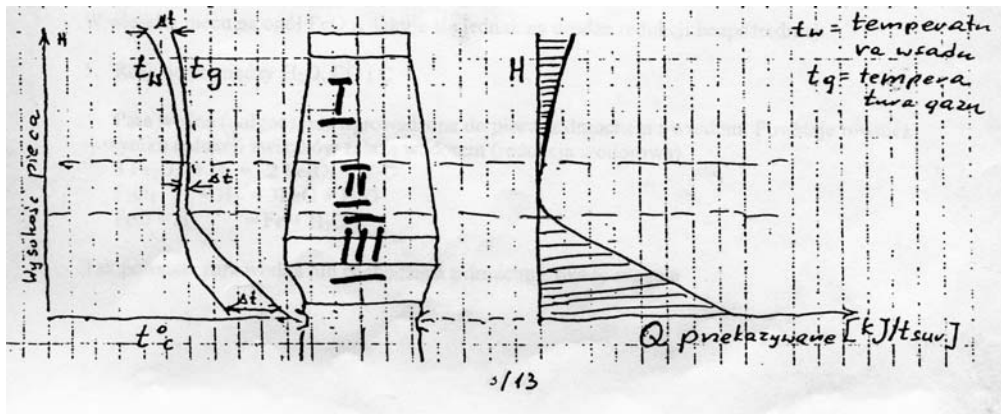
VII. Wymiana ciepła w wielkim piecu

zachodzi między gazem i wsadem. Polega zatem na przekazywaniu ciepła przez gaz wsadowi.

Obecnie przyjmuje się, że wielki piec może być podzielony pod względem wymiany ciepła na trzy strefy tj.:

1. Górną strefę wymiany ciepła **I**
2. Strefę rezerwy cieplnej **II**
3. Dolną strefę wymiany ciepła **III**

Przedstawia to schemat



Rys.15.

Z schematu tego wynika, że największą ilość ciepła przekazuje się wsadowi w dolnej strefie tj. III.

Wynika to z faktu, że temperatura gazu przed dyszami wynosi średnia 2250°C a wsadu (żuźła i surówki) ok. 1500°C. Ten duży gradient temperatury jest czynnikiem intensywnej wymiany ciepłej w tej strefie. Na skutek zachodzącej szybko wymiany ciepła oraz szerokiemu przebiegowi endotermicznych reakcji redukcji i topnienia gradient temperatury zmniejsza się do ok. 30° w temperaturze wsadu ok. 1000°C. Z tego powodu w strefie nr II (strefie rezerwy) wymiana ciepła prawie nie zachodzi.

W strefie I następuje zanik endotermicznych reakcji i topienia a zatem mniejsze zapotrzebowanie ciepła przez wsad stąd (idąc od strefy II do I) następuje powolny wzrost gradientu temperatury i wymiany ciepła, która jest największa w gardzieli gdzie wsad ma temperaturę otoczenia (30°) a gaz od 80 do 250°C.

Idealnie pracujący wielki piec to taki, który ma zbilansowane przychody i rozchody ciepła, strefę rezerwy niezależną od wysokości pieca oraz wypuszczał będzie gaz wielkopiecowy o niskiej rzędu 80° – 100° temperaturze.

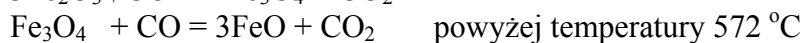
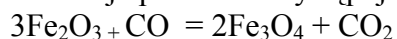
VIII. Reakcje zachodzące w wielkim piecu - od gardzieli (po załadunku wsadu) do trzonu stanowiącego dno garu WP.

1. Już w gardzieli następuje w tem. od 100 do 200°C odparowanie wilgoci nabytej – związanej z wsadem tylko siłami napięcia powierzchniowego.
2. Już od gardzieli rozpoczyna się a kończy w górnej części szybu wydzielanie wody zoolitowej i krystalicznej, która jest związana z tworzywem jako kopalina typu np. $m\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ (uwodnione tlenki żelaza – limonity). Rozpad tej sieci następuje do 600°C. Jest to reakcja endotermiczna zatem takich surowych rud nie warto używać.

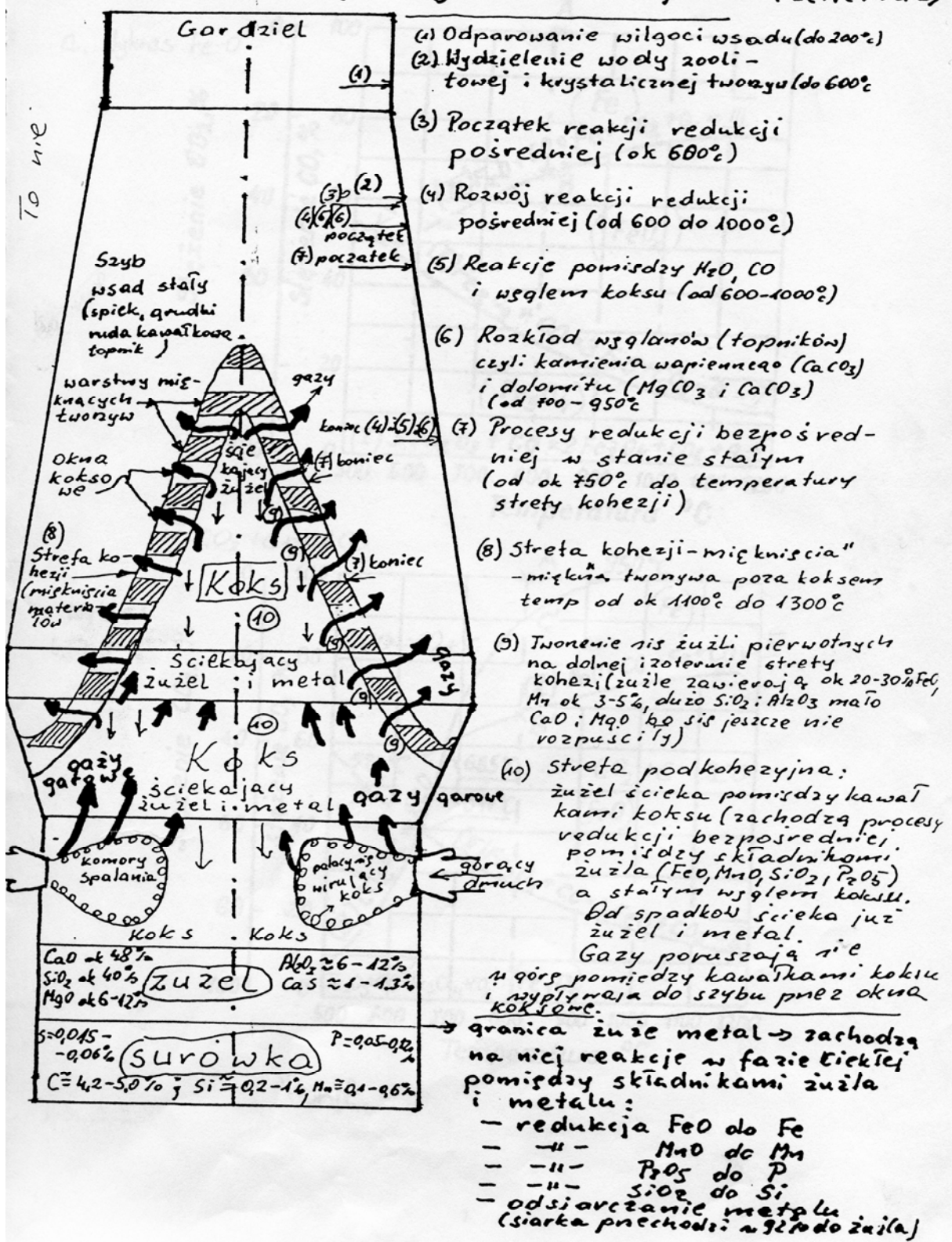
3 i 4 Redukcja pośrednia

Dygresja !

- a) Przez procesy redukcji w metalurgii rozumie się takie reakcje w których następuje odbieranie tlenu z tlenków metali.
- b) W metalurgii żelaza to oznacza odbieranie tlenu z tlenków żelaza
- c) Reduktorem jest ten pierwiastek lub związek chemiczny, który w danych warunkach ciśnienia i temperatury ma większe powinowactwo do tlenu niż metal w tlenku redukowanym
- d) W stosunku do żelaza np. w wielkopiecowych warunkach reductorami są: CO, H₂ i C.
- e) Redukcja pośrednia występuje wtedy kiedy produktem gazowym reakcji jest CO₂



Proces technologiczny w wielkim piecu (schemat)

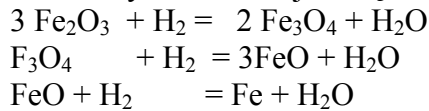


Rys. 16. Proces technologiczny w wielkim piecu (schemat)

W wielkim piecu na ogół FeO redukuje się jednak na drodze redukcji bezpośredniej.

5. Reakcje pomiędzy H₂O, CO i C

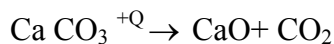
Para wodna (wilgoć) jest wprowadzona do pieca z dmuchem i wsadem. Powstaje również w wyniku redukcji związków żelaza wodorem (redukcja wodorowa)



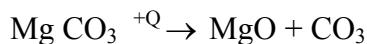
Tak powstała para wodna lub pochodząca z dmuchu i wsadu reaguje



6. Jeśli do wielkiego pieca wprowadzono węglany topnikowe w postaci CaCO₃ i MgCO₃ to w temp. ok. 900°C następuje ich intensywny rozkład.



Są to reakcje silnie endotermiczne wymagające dostarczenia dużych ilości ciepła

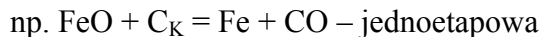


Topniki surowe wprowadza się aby zapewnić odpowiednią masę i jakość żużla. Powinny być wprowadzane jednak ze spiekami, gdyż w przeciwnym razie na ich dysocjację potrzeba dodatkowych ilości ciepła w piecu a więc i dodatkowych ilości koksu.

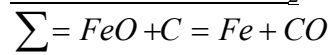
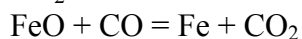
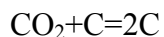
Na 100 kg topnika w/w potrzeba 30 kg koksu wtedy proces jest nie ekonomiczny.

7. Procesy redukcji bezpośredniej

W metalurgii żelaza przez redukcję bezpośrednią rozumie się taki proces redukcji, w którym produktem gazowym jest CO



lub 2 –dwuetapowa



W pełni reakcje te zachodzą powyżej 1000°C a rozwinięty ich zakres pochłania koks, co jest zjawiskiem nieekonomicznym.

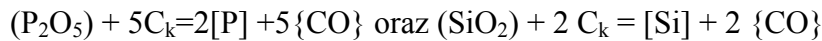
8. W określonej temperaturze materiały żelazodajne mięknią tworząc trudno przepuszczalną strefę mięknięcia tzw. kohezji. Strefa ta jest zawarta pomiędzy dwoma izotermami

T_{pm} – temperatury początku mięknięcia

T_{km} – temperatury końca mięknięcia czyli temperatury topnienia

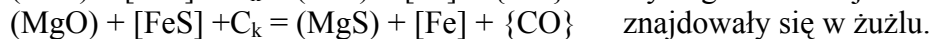
Jest trudno przepuszczalna dla gazów, które mogą wypływać do szybu tylko przez okna koksowe.

9. i 10. Na izotermie T_{km} powstają pierwsze krople cieczy zwanej żuźlami pierwotnymi, które spływają w dół pomiędzy kawałkami koksu od dysz do góry pieca płyną gazy, stąd gazy mają duże opory przepływu a żuźle pienia się i spływają wolno. Podczas spływania tych żuźli zachodzą reakcje redukcji bezpośredniej kształtujące nową ciecz, którą jest metal a mianowicie:



() – żuźel, [] – metal, { } – gaz.

Częściowo zachodzi również reakcja odsiarczania



W garze zbiera się żuźel i metal a na granicy ich podziału zachodzą reakcje w fazach ciekłych.



Tu zachodzi główne odsiarczanie wg w/w reakcji z CaO i MgO. Warunkiem dobrego odsiarczania jest istnienie wolnego CaO i MgO w żuźlu nie związanego z SiO_2 . Jeśli

zasadowość czyli $\frac{CaO}{SiO_2} > 1.0$ a w rzeczywistości $> 1,05$ to odsiarczanie zachodzi. Ok.

93% siarki jest wyprowadzane z żuźlem, 5% przechodzi do surówki a ok. 3% uchodzi z gazami. Dobra surówka przeróbcza to taka, że ma mało $< 0,025S$, $< 0,1P$, mało Si = 0,2-0,5, mało Mn = 0,1-0,4 a dużo C = 4,5 – 5,0%. Surówki odlewnicze mają dużo Si $> 1,75\%$, P $> 0,5\%$ mniej C ok. 4,2%.

Rozwinięcie zagadnień związanych z reakcjami zachodzącymi w WP.

Ad.1. Usuwanie wilgoci i rozkład węglanów w wielkim piecu

1.1. Źródła wilgoci w górnej części pieca

Wszystkie materiały zasypywane do wielkiego pieca zawierają pewne ilości wilgoci. Może to być wilgoć naturalna związana, zawarta w tworzywach stosowanych w tym procesie, bądź tak zwana wilgoć nabyta (powierzchniowa), pochodząca z technologii zastosowanych operacji przygotowawczych lub wpływu warunków atmosferycznych.

Wilgoć naturalna występuje przede wszystkim w rudach, które po wydobywaniu w kopalniach zawierają mniejsze lub większe ilości wody higroskopijnej, zależnie od stopnia nasycenia wodą złoża i stanu fizycznego rudy. Zawartości te wahają się od ułamkowych czy kilkoprocentowych zawartości wody w zwartych i niskoporowatych magnetytach czy hematytach aż do 20-30% udziału wody w tzw. gliniastych rudach brunatnych. Zawartość w nich wilgoci jest uzależniona od udziału poszczególnych odmian, które wstanie chemicznie czystym wnoszą następujące ilości wody chemicznej związanej z tlenkami żelaza:

- hydrogetyt $3Fe_2O_3 \cdot H_2O$	- 3,62% H_2O ;
- turgit (hydrohematyt) $2Fe_2O_3 \cdot H_2O$	- 5,32% H_2O ;
- getyt $Fe_2O_3 \cdot H_2O$	- 10,11% H_2O ;
- limonit $2Fe_2O_3 \cdot 3H_2O$	- 14,46% H_2O ;
- ksantocyderyt $Fe_2O_3 \cdot 2H_2O$	- 18,39% H_2O ;

- limnit $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$

- 25,26% H_2O .

Oprócz wody krystalicznej, chemicznie związanej zarówno z tlenkami podstawowych metali, tj. żelaza i manganu, jak i różnymi składnikami skały płonnej (np. kaolinit $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ o zawartości 13,9% H_2O), na pojęcie wilgoci naturalnej składa się woda zeolitowa, wchodząca w skład roztworów stałych wodnych zwanych hydrozolami. Różnica pomiędzy wodą krystalizacyjną a zeolitową polega na tym, że o ile woda krystalizacyjna (chemicznie związana) jest składnikiem sieci krystalicznej różnych wodzianów, zajmując w ich sieci określone miejsca, to woda zeolitowa nie zajmuje ustalonego stanowiska w sieciach składników roztworów stałych.

Wilgoć nabyta związana jest z technologią przygotowania tworzyw, z ich składowaniem i transportem. W wypadku stosowania wsadu przygotowanego w postaci spieków czy grudek zawartość wilgoci jest bardzo mała, a jej zwiększenie może nastąpić ewentualnie pod wpływem czynników atmosferycznych. To samo dotyczy ewentualnego wzrostu nawilgocenia pozostałych tworzyw, tj. topników czy koksu. W przypadku koksu zawartość w nim wilgoci zależy w dość znacznym stopniu od stosowanego sposobu gaszenia placka koksowego po wypchnięciu go z komory koksowniczej. Stosowanie suchych metod gaszenia zmniejsza zawartość wody w koksie do 3-5%, natomiast przy gaszeniu metodami mokrymi dochodzi ona nawet do 10% i więcej.

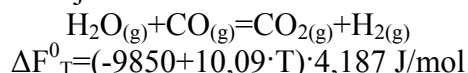
1.2. Zakresy temperaturowe usuwania wilgoci

Wilgoć nabyta jest stosunkowo słabo związana z masą rudną przez siły napięcia powierzchniowego, toteż można ją najłatwiej usunąć z tworzyw, co zachodzi już w zakresie temperatur nieco powyżej 373K, a więc począwszy od gardzieli wielkiego pieca. Intensywnemu parowaniu wilgoci z materiałów wsadowych sprzyja duża szybkość (w nowoczesnych wielkich piecach ok. 8,0-11,0 m/s) strumienia przepływających gazów, których temperatura na gardzieli sięga od ok. 473 do 573K i więcej. Odparowanie wilgoci nabytej ułatwia także fakt, że jest ona skupiona głównie na powierzchni ziaren. W tych samych zakresach temperaturowych zaczyna odparowywać woda zeolitowa, która z uwagi na omówiony powyżej jej charakter występowania w rudach wydziela się całkowicie w zakresie do ok. 673K.

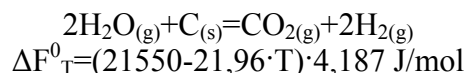
W zakresie temperatur powyżej 573K zapoczątkowany zostaje rozkład wodzianów i wydzielanie się wody krystalicznej, chemicznie związanej z tlenkami metali i równomiernie rozmieszczonej w całej masie kawałków wsadu. Stąd też na zakres jej wydzielenia duży wpływ wywiera struktura rudy i jej kawałkowość. W wielkim piecu podane temperatury panują na przejściu gardzieli w szyb, jednak że wskutek obsuwania się słupa tworzyw rozkład wodzianów kończy się w zakresie wyższych temperatur. Dotyczy to zwłaszcza wody występującej w kaolinicie, którego intensywny rozkład wody krystalicznej zaczyna się w temperaturach 673-773K, a przy szybkim nagrzewaniu kończy dopiero przy ok. 1273K. W wielkim piecu dzięki intensywnemu ruchowi gazów rozkład ten kończy się już przy ok. 923K.

1.3. Reakcje rozkładu pary wodnej

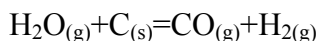
- w zakresie temperatur poniżej 773K:



- w zakresie temperatur 773-1273K:



- w temperaturach powyżej 1273K:



$$\Delta F^0_T = (31400 - 32,05 \cdot T) \cdot 4,187 \text{ J/mol}$$

Reakcje te są źródłem rosnących zawartości wodoru w gazie wielkopieczowym w miarę zbliżania się do poziomu gardzieli.

Ad.6. Procesy dysocjacji cieplnej związków węglanowych

Ad.6.1. Udział tworzyw węglanowych we wsadzie wielkopieczowym

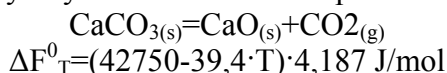
Wśród tworzyw przerabianych w wielkim piecu znajdują się m.in. różne związki węglanowe. W warunkach przemysłowych w odpowiednim zakresie temperatur związki te ulegają dysocjacji cieplnej, a wydzielający się w tych procesach CO₂ powoduje zmianę składu gazów w górnych strefach wielkiego pieca. Wzrastające z tego powodu procentowe zawartości CO₂ w gazie mogą w dość wyraźny sposób oddziaływać na dalszy przebieg procesów redukcji z udziałem reduktorów gazowych, powodując bardziej lub mniej wyraźne zbliżenie się do warunków równowagowych.

Jakkolwiek w miarę rozpowszechniania się przerobu w wielkich piecach wsadu całkowicie przygotowanego (spieku lub grudek) uległa znacznemu ograniczeniu rola i wpływ dysocjacji cieplnej związków węglanowych na kształtowanie się składu gazu w szybie wielkiego pieca, to jednak nie można całkowicie pominąć tych procesów. W nowoczesnej technologii stosowany jest bowiem nadal bezpośredni dodatek surowego topnika do wielkiego pieca. Ogólnie biorąc, wsad wielkopieczowy może zawierać:

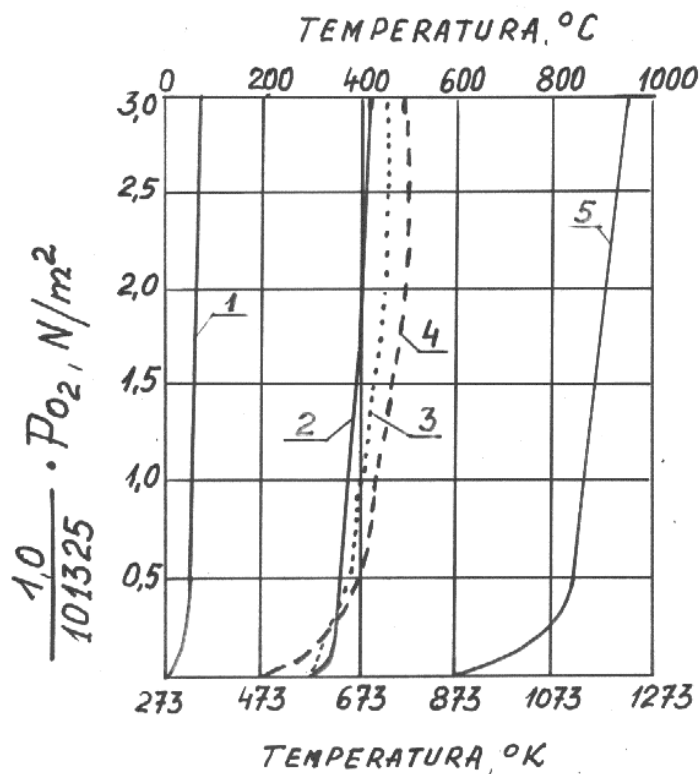
1. minerały węglanowe proste, tj. kalcyt CaCO₃ (w wapieniu, zwanym po jego rozkruszeniu kamieniem wapiennym), albo złożone, tj. dolomit CaMg(CO₃)₂;
2. węglan żelazawy FeCO₃ (zwany w postaci rudnej syderytem) i węglan manganawy MnCO₃ (rodochrozyt).

Ad.6.2. Rozkład węglanu wapnia CaCO₃

Mała rozpuszczalność wyjściowej fazy skondensowanej (w roztworach stałych CaO-CaCO₃ udział maksymalny nie przekracza 4%) występuje przy dysocjacji węglanu wapnia CaCO₃, który to proces przy powyższym założeniu można przedstawić równaniem:

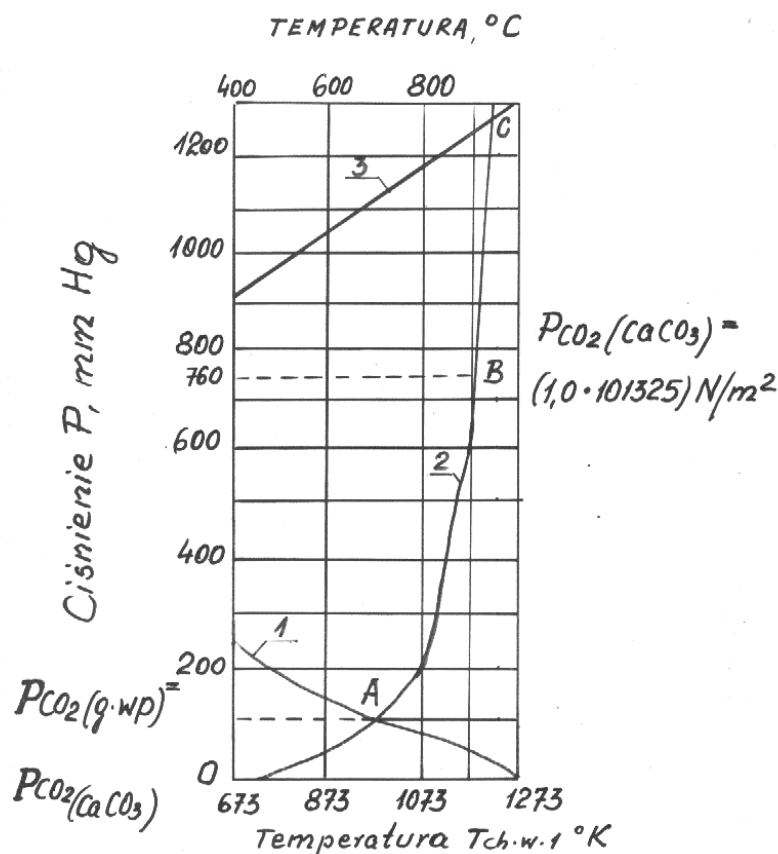


Badania zależności prężności dysocjacji tego węglanu od temperatury $p_{\text{CO}_2(\text{CaCO}_3)} = f(T)$ wykazują załamanie krzywych przy 1520K, co potwierdza występowanie mieszaniny eutektycznej obydwóch faz skondensowanych, występujących w tym równaniu. Istnienie rozpuszczalności obu tych związków w stanie stałym potwierdza także pozostałość CO₂ w wapieniu wypalonym w takich warunkach cieplnych, w których czysta faza CaCO₃ ulega całkowitemu rozkładowi. Ze względu na brak wtórnych reakcji pomiędzy produktami rozkładu CaCO₃, temperaturę tego rozkładu można z dużą dokładnością ustalić na drodze przeliczeń termodynamicznych; dla ciśnienia $p_{\text{CO}_2} = 101325 \text{ N/m}^2$ temperatura ta wynosi 1140-1170K. Natomiast temperatura doświadczalnie ustalona jest nieco wyższa i waha się w zakresie od 1170 do 1190K. Różnica ta przy naturalnych wapieniach wynika niewątpliwie z wpływu domieszek, struktury, porowatości, stopnia rozdrobnienia. Prężność dysocjacji zależy bowiem od stosunku liczby cząsteczek powierzchniowych do znajdujących się wewnątrz kryształu. Zależność prężności dysocjacji od temperatury przedstawiono na rys.3.



Rys.17. Krzywe dysocjacji cieplnej węglanów wchodzących w skład wsadu wielkopiecowego: 1- węglanu manganowego $MnCO_3$, 2 – węglanu żelazawego $FeCO_3$, 3 – węglanu magnezowego $MgCO_3$, 4 – dolomitu $CaMg(CO_3)_2$, 5 – węglanu wapniowego $CaCO_3$.

Na rys. 18 pokazano krzywą dysocjacji $CaCO_3$ w nawiązaniu do zmian prężności cząstkowej CO_2 w gazie na poziomie szybu i do całkowitego ciśnienia tych gazów. Jak widać, rozkład wapienia w warunkach wielkiego pieca może zaczynać się już powyżej 1010K (punkt A), zaś intensywnie zachodzi przy temperaturze ok. 1170K, odpowiadającej tzw. chemicznemu wrzeniu (punkt B), przyjmowanemu za temperaturę rozkład w warunkach wielkopiecowych (chemiczne wrzenie zwane też gorącym wrzeniem, odpowiada temperaturze, przy której prężność dysocjacji osiąga wartość $101325 N/m^2$).

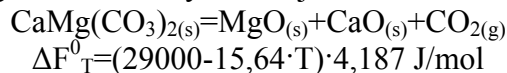


Rys.18. Przebieg dysocjacji cieplnej węglanu wapniowego CaCO_3 w warunkach wielkiego pieca wg Goldsteina: 1 – zmiana prężności dysocjacji węglanu wapnia p_{CO_2} z temperaturą, 2 – zmiana prężności cząstkowej dwutlenku węgla p_{CO_2} w gazie wielkopiecowym, wzdłuż wysokości szybu, 3 – zmiana całkowitego ciśnienia P gazu wielkopiecowego wzdłuż wysokości szybu, A – początek rozkładu CaCO_3 w warunkach wielkopiecowych, B – punkt chemicznego wrzenia, C – koniec rozkładu CaCO_3 w wielkim piecu.

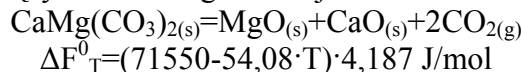
Ad.6.3. Rozkład dolomitu $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$

Przebieg dysocjacji cieplnej dolomitu zależy od prężności cząstkowej dwutlenku węgla, która decyduje o jedno- lub dwustopniowym przebiegu tej reakcji.

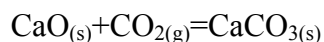
Dwustopniowa dysocjacja dolomitu następuje wówczas, gdy w temperaturze jego dysocjacji prężność cząstkowa CO_2 , w atmosferze otaczającej jest wyższa od prężności dysocjacji węglanu wapniowego CaCO_3 w myśl reakcji:



która jest sumą dwóch zachodzących równolegle reakcji:



oraz



Ad.6.4. Rozkład węglanu żelazawego FeCO_3 i węglanu manganowego MnCO_3

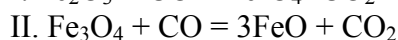
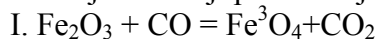
Rozkład związków węglanowych żelaza i manganu ma charakter znacznie bardziej złożony od omówionego przebiegu dysocjacji wapienia i dolomitu. Jeżeli bowiem powstające z topników – jako produkty rozkładu w fazie skondensowanej – tlenki CaO i MgO są związkami trwałymi, to tworzące się z FeCO_3 lub z MnCO_3 , po usunięciu CO_2 , w tej samej

fazie produkty są fazami metastabilnymi (nietrwałymi). Stąd też w poglądach na przebieg omawianych procesów występują dość znaczne rozbieżności, odnoszące się .in. do wielkości charakteryzujących je efektów cieplnych. Proces dysocjacji FeCO_3 następuje w temperaturze ok. 913K w myśl reakcji:



Rozwinięcie pkt.3, 4 i 7 – procesy redukcji

Reakcje redukcji pośredniej nr I, II, III zachodzą powyżej 572°C



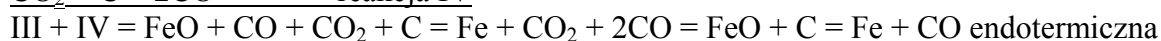
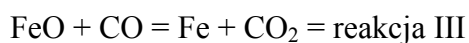
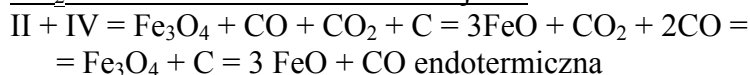
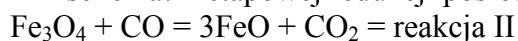
IV. $\text{Fe}_3\text{O}_4 + 4 \text{CO} = 3\text{Fe} + \text{CO}_2$ zachodzi poniżej 572°C – wyłącznie. Reakcja I zachodzi poniżej i powyżej 572°C

(Fe) = pole Fe

(FeO_x) – pole FeO

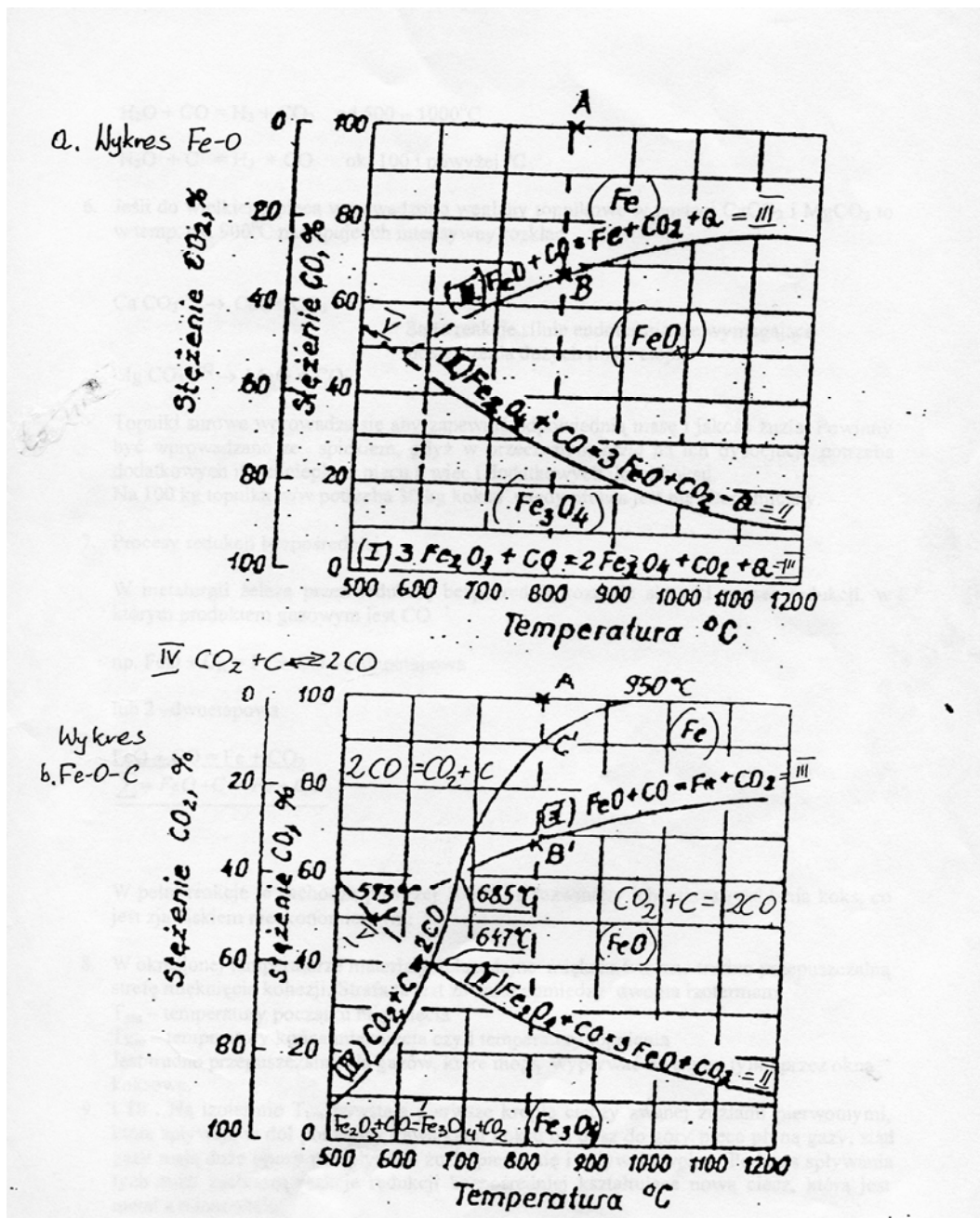
(Fe_3O_4) – pole Fe_3O_4

Wykres „b” jest charakterystyczny dla redukcji bezpośredniej, gdyż pojawił się węgiel w układzie. Zwykle reakcja nr I (redukcja hematytu Fe_2O_3) zachodzi wyłącznie drogą pośrednią, gdyż wystarczy minimalne stężenie aby reakcja ta zaszła. Dla innych reakcji II i III schemat 2-etapowej redukcji pośredniej jest następujący:



Jak z powyższego wynika obie te reakcje redukcji bezpośredniej zużywają w efekcie węgiel. Węgiel ten już nie dojdzie w dół pieca do komór spalania. Zatem z niego przy braku spalania nie otrzymamy ciepła. Oprócz tego w/w reakcje jak endotermiczne również pochłaniają ciepło z w.pieca (ze spalania koksu).

Z powyższego wynika, że rozwój redukcji bezpośredniej prowadzi do wzrostu zapotrzebowania na ciepło, czyli w efekcie powoduje wzrost zużycia paliwa koksowego i wzrost kosztu produkcji surówki.



Rys. 19. wykresy równowagowe: a. Fe-O, b. Fe-O-C

Ad.9 i 10. Żużle wielkopiecowe.

W procesie wielkopiecowym uczestniczą m.in. dwie nie mieszające się ze sobą fazy ciekłe o różnych masach właściwych. Są to surówka (stop żelaza z węglem i innymi pierwiastkami, w którym zawartość węgla wynosi powyżej 2%, a w praktyce powyżej 4%) oraz żużle (ciekłe związki krzemianowe tlenków metali nie redukujących się w wielkim piecu w ogóle lub w ograniczonym stopniu).

W zależności od różnego składu skały płonnej rud, spieków i grudek oraz różnych metod prowadzenia wielkiego pieca otrzymywane żużle wykazują znaczne różnice tak pod względem chemicznym jak i pod względem własności fizycznych.

Skład chemiczny żużli wielkopiecowych.

Podstawowymi składnikami żużli są dla surówek przeróbczych:

Zużel spustowy

SiO₂ 36-40%

CaO 36-48%

Al₂O₃ 5-10%

oraz CaS 1,5 – 3%

MnO ≈ 1,0

FeO ≈ 1,0

Zużel pierwotny

FeO – 30%

MnO – 8 – 10%

Mało CaO ok. 8-10 MgO ok. 2%

SiO₂ 36 – 40%

Al₂O₃ 8 – 12

Potem rozpuszcza się CaO i MgO w miarę schodzenia żużla w dół gdy FeO, MnO się redukują

Z wymienionych tlenków redukują się z żużla do surówki jedynie w większym stopniu MnO, SiO₂ i reszta FeO. Natomiast CaO, MgO i Al₂O₃ nie redukują się w wielkim piecu w ogóle.

Lepkość żużli.

Def. ogólna.

Lepkością lub wiskozą nazywamy tę właściwość ciała (gazowego, ciekłego lub stałego), która sprawia, że przy zmianie kształtu występują w ciele naprężenia ścinające, wykazujące proporcjonalność do prędkości zmian kształtu.

Def. II.

W węższym zakresie ujmowania zjawiska:

Lepkość jest własnością cieczy lub gazu, polegającą na stawianiu oporu przy przesuwaniu laminarnym (uwarstwionym) i nie przyspieszonym dwóch graniczących ze sobą warstewek cieczy lub gazu.

Dla żużli lepkość jest rzeczywistą stałą zależną jedynie od temperatury i ciśnienia

$$\tau = \eta \frac{dv}{dx} \quad \text{gdzie:}$$

τ - naprężenie ścinające [$m^{-1}kg s^{-2}$]

$\frac{dv}{dx}$ - spadek (gradient) prędkości, prostopadły do kierunku przepływu [s^{-1}]

v - pr. przepływu [ms^{-1}]

$$\left[\frac{Ns}{m^2} \right]$$

podwielokrotność

$$1 \text{ puaz} = 1 \text{ p.} = \left[10^{-1} \frac{Ns}{m^2} \right] = \text{Pa sek}$$

$$1 \text{ cP} = 10^{-3} \frac{Ns}{m^2}$$

Zależność lepkości dynamicznej od temperatury jest następująca:

$$\eta = A_o * \exp \frac{\Delta E \eta}{RT}$$

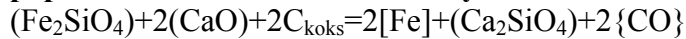
Lepkość żużli zarówno pierwotnych jak i końcowych ma duże znaczenie dla pracy pieca wpływając na rozkład strumieni gazów w spadkach oraz przebieg reakcji redukcji Si, Mn i odsiarczania surówki. Gęste żużle wolno spływając między kawałkami koksu blokują drogę gazom powodując zawisy i tworzenia narostów.

Ważne w praktyce jest ustalenie takiego wsadu, z którego powstały żużel miałby małą lepkość.

VIII.a. Reakcje zachodzące pomiędzy żużlem a metalem.

a). Redukcja tlenków żelaza z fazy ciekłej.

Żelazo w ciekłej fazie żuźlowej znajduje się w postaci krzemianów żelaza lub eutektyk tych związków. Między strefą topnienia a poziomem dysz zawartość FeO w żuźlu zmienia się od 8 do 3%. **Bogate w żelazo są powstające żuźle pierwotne,** które ściekają w dół przesączają się pomiędzy kawałkami koksu. **Redukcja tlenków żelaza w tej strefie z fazy ciekłej zachodzi więc węglem koksu. Obecność tlenku wapnia ułatwia przebieg redukcji poprzez rozkład soli krzemianowych.**



Zachodzi ta reakcja na drodze ściekania żuźla do garu z pochłonięciem ciepła (endotermiczne). Ostateczna redukcja ciekłych tlenków żelaza do zawartości w żuźlu (FeO) poniżej 1% zachodzi w garze pomiędzy metalem i żuźlem.

Zbyt gwałtowne ściekanie żuźla posiadającego niezredukowane tlenki żelaza powoduje zbyt duże rozwinięcie endotermicznych procesów w garze, co prowadzi do oziębienia garu i wpływa niekorzystnie na skład surówki. Informację o przebiegu redukcji tlenków żelaza z żuźla uzyskuje się przez kontrolę analizy składu żuźla i przez jego obserwację na spuście. Żuźel taki po ostygnięciu jest czarny a w czasie spustu jest gęsty o ciemnej barwie.

b). Redukcja tlenku krzemu w wielkim piecu.

Źródłem krzemu w surówce jest krzemionka, która występuje w skale płonnej materiałów żelazodajnych. W fazie stałej przebieg redukcji krzemionki jest minimalny z uwagi na mały kontakt rud z koksem. W temp. powyżej 1300°C związki krzemionki wraz z innymi tlenkami przechodzą w stan ciekły co powoduje rozwój reakcji w układach żuźel-metal-węgiel koksu oraz żuźel-metal nasycony C. Ilość fazy żuźlowej, jej skład chemiczny i własności fizykochemiczne ma istotne znaczenie na przebieg redukcji SiO₂ a więc i na końcową zawartość Si w surówce. Duży wpływ na redukcję SiO₂ i przejście krzemu z żuźla do metalu mają warunki cieplne panujące w garze.

Reakcja redukcji Si w WP wymaga dla swojego przebiegu wysokiej temperatury i dużych ilości ciepła. Wahania zawartości Si w surówce na spuście stanowią wskaźnik mówiący o stanie cieplnym garu. Ilość zredukowanego Si zależy również od zasadowości żuźla, im większa zasadowość żuźla tym trudniej zredukować SiO₂ a tym samym zawartość Si w metalu jest mniejsza.

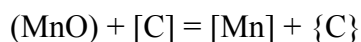
Przykład reakcji:



c). Redukcja tlenku manganu w wielkim piecu w fazach ciekłych

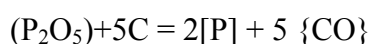
Redukcja tlenku manganowego z żuźla zachodzi w garze WP węglem koksu i metalem.

Przykład reakcji:



Reakcja przebiega ze znacznym pochłonięciem ciepła, duży jej rozwój następuje w wysokich temperaturach i przy wysokiej zasadowości żuźla. Współczynnik podziału wynosi ok. 60% i jest tym większy im wyższa zasadowość i im mniejsza masa żuźla.

d). Redukcja pięciotlenku fosforu

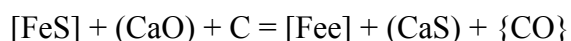


Redukcja fosforu zachodzi stopniowo w miarę obniżania się FeO w żuźlu i praktycznie jest zakończona na poziomie dysz. Cały fosfor przechodzi z żuźla do metalu a sposób w jaki możemy oddziaływać na jego zawartości w surówce to tylko odpowiednie dobranie wsadu wielkopiecowego.

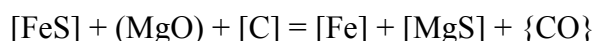
f). Reakcja odsiarczania.

Jest jedną z najważniejszych reakcji wpływających na jakość surówki. Zachodzi już wstępnie przy ściekaniu żuźla w spadkach a największy jej rozwój następuje w garze wielkiego pieca. W garze reakcja ta zachodzi na granicy podziału faz metal-żuźel. Im mniejsza lepkość (ułatwiony transport), większa ciepłota garu i zasadowość żuźla tym przebieg przejścia siarki z metalu do żuźla lepszy i proces odsiarczania przebiega wydajniej.

Przykład reakcji.



w bardziej ograniczonym stopniu



Warunki najlepszego przebiegu technologicznego i ekonomicznego dla reakcji odsiarczania.

1. Dobra ciepłota garu (osiąga się ją przez równomierny bieg pieca a zmiany ciepłoty wtedy nie są duże i można je regulować temp. Dmuchu lub H₂O dmuchu)
2. Zasadowość żuźla rzędu 1,05 – 1,15. Wtedy również jest niska lepkość żuźla (osiąga się przez odpowiedni dobór składników wsadu namiarowanych do WP). Najlepiej jest stosować sam spiek o odpowiedniej zasadowości.

IX. Produkty wytopu

1. surówki przerobcze	2. surówki odlewnicze	Surówki zwierciadliste – do prod. Żeliwa
Si – 0,3 – 1,2	1,5 – 4,0	Max 2%
Mn – 0,2 – 1	Max 1%	10-25%
P – 0,05 – 0,2	0,1 – 1,2%	Max. 0,3
S – 0,01 – 0,035	Max 0,05	Max 0,3
C – 4 – 5%	3,4 – 4,2	Ok. 4

2. Żelazomangan

S, max 1,5, Mn 60 – 85%, P_{max} = 0,5 , S_{max} = 0,02

3. Gaz wielkopiecowy

CO – 21-30

CO₂ - 22 – 10

H₂ – 68 – 50

4. Pył WP

Fe – do 40%

C – do 15%

$$\frac{CaO}{SiO_2} = 0,5 - 1. \text{ i to niekorzystne}$$

X. Zastosowanie gorącego dmuchu w wielkim piecu

Ciepło wniesione do pieca przez gorący dmuch uzupełnia ciepło uzyskane ze spalania koksu przed dyszami i dlatego rozchód koksu zmniejsza się. Jednakże oszczędność paliwa nie jest proporcjonalna do podwyższenia temperatury dmuchu i nie we wszystkich wypadkach jednakowa.

Z badań wynika, im większy jest początkowy rozchód koksu, tym wpływ podnoszenia temperatury dmuchu jest bardziej wyraźny. Oszczędność koksu można wyrazić wzorem według Pawłowa.

$$E = \frac{V_d \cdot c_d \cdot t_d \pm Q}{K_T \cdot W}$$

gdzie:

- E – oszczędność ciepła, kcal/t surówki,
- V_d, c_d, t_d – objętość, ciepło właściwe i temperatura dmuchu (lub różnica temperatur dmuchu),
- Q – zmiana bilansu ciepła spowodowana podwyższeniem temperatury dmuchu z wyjątkiem ciepła, które zostało wniesione przez dmuch o podwyższonej temperaturze,
- K_T – współczynnik cieplnej pracy pieca,
- W – całkowite zużycie ciepła według bilansu cieplnego.

Wraz z podwyższeniem temperatury dmuchu i zmniejszeniem zużycia koksu temperatura gazów gardzielowych i ilość ciepła unoszona w gazach zmniejszają się. Jeżeli zostanie zachowana poprzednia ilość dmuchu i poprzednia ilość spalanego w jednostkach czasu koksu, to obniżenie zużycia paliwa na tonę surówki jest równoznaczne ze zwiększeniem produkcji surówki. W tych warunkach ta sama ilość gazów płynie naprzeciw większej ilości wsadu i może im oddać więcej ciepła. Gazy ochładzają się w większym stopniu i temperatura ich w gardzieli jest niższa. Ponieważ ilość gazów na jednostkę surówki jest mniejsza i temperatura ich jest niższa, dlatego ilość ciepła unoszona w gazach jest mniejsza. Ze względu na wzrost produkcji surówki straty cieplne przypadające na tonę surówki są mniejsze i dzięki temu również K_T wzrasta.

Ciepło wprowadzone do wielkiego pieca przez gorący dmuch wykorzystane jest w pełni w piecu i może być zużyte bezpośrednio w garze na nagrzewanie dolnej części pieca, redukcję bezpośrednią oraz odsiarczanie surówki. Ciepło to nie może być tracone w gazach gardzielowych, gdyż zgodnie z pomiarami straty cieplne pieca wraz z podwyższeniem temperatury dmuchu zmieniają się. W ten sposób współczynnik wykorzystania ciepła gorącego dmuchu w wielkim piecu wynosi 100%.

Ciepło uzyskane ze spalania w garze C na CO nie jest wykorzystywane w pełni, gdyż jego część unoszona jest przez gardziel wielkiego pieca jako ciepło jawne gazów. Jeżeli do wielkiego pieca wprowadza się pewną ilość ciepła przez gorący dmuch, to temu odpowiada zmniejszenie ilości węgla spalanego przed dyszami w stosunku odpowiadającym współczynnikowi cieplnej pracy pieca K_T . Jeżeli np. $K_T = 0,8$, a gorący dmuch wniósł do pieca 100 kcal, to oszczędność uzyskana ze zmniejszenia ilości spalonego węgla wynosi

100:0,8=125 kcal. Osiągnięte efekty potwierdzają zasadę wygłoszoną przez Akermana, że „gorący dmuch oszczędza więcej ciepła niż go wnosi”.

Nierównomierny bieg pieca i obrywanie się wsadu niedostatecznie przygotowanego i nagrzanego może wpłynąć na wzrost redukcji bezpośredniej.

Na wykorzystanie w wielkim piecu dmuchu o wysokiej temperaturze wpływają następujące czynniki:

1. Wzrost wskaźnika redukcji bezpośredniej pozwala podwyższyć temperaturę dmuchu. Ciepło gorącego dmuchu służy w tym przypadku na pokrycie zapotrzebowania cieplnego redukcji bezpośredniej i wpływa równocześnie korzystnie na obniżenie rozchodu koksu. Im wskaźnik redukcji bezpośredniej jest wyższy, tym nagrany dmuch może dać większą oszczędność koksu.
2. Zawartość w surówce trudno redukcyjnych składników Si, Mn, Cr, które dla swojej redukcji wymagają zwiększenia ilości ciepła w garze. Tym też można wyjaśnić większą efektywność nagrzania dmuchu przy wytapianiu żelazostopu.
3. Wdmuchiwanie wraz z gorącym dmuchem wilgoci lub paliw zastępczych, których rozkład i podgrzanie odbywa się kosztem ciepła jawnego gorącego dmuchu.
4. Zastosowanie spieku samotopliwego powoduje zwiększenie przewodności wsadu oraz brak we wsadzie węglanów, których rozkład wymaga znacznych ilości ciepła w szybie. Ponieważ podwyższenie temperatury dmuchu wpływa ujemnie na równomierny przepływ gazów oraz powoduje znaczne zmniejszenie temperatur w szybie, zastosowanie spieku samotopliwego wpływa korzystnie na pracę pieca przy wysokiej temperaturze dmuchu.

Wysoka temperatura dmuchu podwyższa temperaturę spalania koksu przed dyszami wielkiego pieca.

Wysoka temperatura dmuchu wpływa na zwiększenie energii kinetycznej dmuchu i tym samym na wydłużenie komory spalania. Równocześnie jednak wysoka temperatura dmuchu powoduje zwiększenie intensywności spalania koksu, co przybliża ognisko spalania i strefę najwyższej temperatury w komorze spalania do wylotu dyszy. Wypadkowa tych dwóch zjawisk zależna jest od przewagi efektu pierwszego lub drugiego. Przy drobnym i bardzo reakcyjnym koksie wysoka temperatura dmuchu może spowodować skrócenie komory spalania lub wzrost oporu dla przepływu gazów w szybie i to wpływa ujemnie na ilość dmuchu, a tym samym na zmniejszenie energii kinetycznej dmuchu.

Wpływ wysokiej temperatury dmuchu na pracę i wskaźniki wielkiego pieca według nowych danych w zakresie temperatur 600-1200°C przedstawia wykres na rys. 17.

X.1. Stosowanie nawilżania dmuchu

Dodatek pary do dmuchu o wysokiej temperaturze ma na celu uzyskanie przez rozkład pary dodatkowej ilości CO i H₂ wzbogacających gaz. Rozkład pary przebiega w myśl reakcji $H_2O+C=H_2+CO-29\ 730$ kcal i odbywa się kosztem ciepła jawnego dmuchu wniesionego do garu. Teoretyczny skład gazu wypływającego z komory spalania zmienia się wraz z dodatkiem wilgoci (tabl. 1).

Dla wyrównania strat ciepła zużytego na rozkład wilgoci dmuchu należy nagrzać dmuch o 9°C na 1 g/m³ dodanej wilgoci lub o 72°C na 1% wilgoci w dmuchu. Nawilżenie dmuchu pozwala zwykle podwyższyć temperaturę dmuchu więcej niżby to wynikało z potrzebnej ilości ciepła na rozkład pary wodnej, co oczywiście daje dodatkowe korzyści i oszczędność koksu. Zjawisko to wynika stąd, że otrzymane z rozkładu pary wodnej H₂ i CO poprawiają warunki reakcji redukcji pośredniej w szybie i tym samym zmniejszają zapotrzebowanie ciepła na redukcję pośrednią w garze.

Ujemnie zjawiska wywołane bardzo wysokimi temperaturami dmuchu, takimi jak zmiana rozkładu temperatur wzdłuż wysokości pieca, nadmierne obniżenie strefy powstawania żużli pierwotnych oraz parowanie SiO, zostają złagodzone i zmniejszone dodatkiem pary. Odparowanie SiO wznosząc się ku górze, już w spadkach kondensuje się i zapelniając puste miejsca między kawałkami koksu utrudnia przepływ gazu. Obniżenie temperatury w strefie spalania zmniejsza parowanie SiO i tym samym przyczynia się do równomiernej pracy pieca.

Nawilżanie dmuchu ułatwia regulację ciepłoty garu bez konieczności zmiany temperatury dmuchu. Zmiana temperatury dmuchu wywołuje duże przesunięcia stref cieplnych w piecu, przesunięcie strefy powstawania żużla pierwotnego, zmianę przepływu gazów z środkowego na obrzeżny i na odwrót i tym samym przyczynia się do powstawania znacznych zaburzeń biegu pieca.

Zmiana wilgoci dmuchu przy zachowaniu temperatury dmuchu na stałym poziomie wywołuje tylko zmianę temperatury w strefie spalania, natomiast zmiany temperatur ponad strefę dysz są stosunkowo nieznaczne. Regulacja pracy pieca przez zmianę ilości wilgoci dmuchu daje możliwość uzyskania równomiernej pracy pieca w stosunkowo szerokich granicach zmiany ciepła w garze.

Dodatek wilgoci w ilości 10 g/m^3 przy pełnej cieplnej kompensacji za pomocą odpowiedniego podwyższenia temperatury dmuchu pozwala na zwiększenie produkcji wielkiego pieca o około 4% i równocześnie na obniżenie zużycia koksu o 1-1,5%. Jest to wynikiem wzbogacenia gazu w CO i H₂, których działanie redukcyjne wpływa korzystnie na zmniejszenie zakresu redukcji bezpośredniej i oszczędność koksu.

X.2. Stosowanie paliw zastępczych w wielkim piecu

Nowoczesna technologia wielkopiecowa stosuje wdmuchiwanie do garu wraz z powietrzem dmuchu paliw zastępczych, jak np. gazu ziemnego lub koksowniczego, olejów, smoły i pyłu węglowego niekiedy z równoczesnym wzbogaceniem dmuchu w tlen. W tym przypadku przebieg spalania przed dyszami zmienia się tylko nieznacznie, natomiast w dużym stopniu zmienia się ilość i skład gazów uchodzących z komór spalania oraz temperatura płomienia.

Paliwa wdmuchiwane mają temperaturę niską (zwykle temperaturę otoczenia), natomiast koks podawany do komór spalania ma temperaturę 1450-1500°C. Jediną reakcją egzotermiczną zachodzącą w strefie spalania jest reakcja spalania nagrzanego C za pomocą gorącego dmuchu na CO, natomiast inne reakcje pochłaniają ciepło.

Szczególnie skomplikowane zjawiska zachodzą z chwilą wdmuchiwania do dysz paliw bogatych w węglowodory. W tym przypadku znaczne ilości ciepła zostają pochłonięte na nagrzanie zimnych paliw do temperatur panujących przed dyszami, na rozkład termiczny węglowodorów oraz endotermiczne reakcje pomiędzy produktami spalania paliw: CO₂ i H₂O oraz C koksu (na regenerację CO₂ i H₂O).

Wodór zawarty w gazach powstałych ze spalania paliw zastępczych jest reduktorem współdziałającym z CO w wielkim piecu. Reakcja redukcji za pomocą H₂ jest mniej endotermiczna niż, reakcja redukcji bezpośredniej za pomocą C i to oczywiście jest korzystne dla bilansu cieplnego wielkiego. Sumując wszystkie efekty powstające przy wdmuchiwaniu paliw zastępczych otrzymuje się wynik końcowy, zależnie od składu paliwa zastępczego, nieznacznie dodatki lub nawet ujemny.

Dla zachowania równowagi cieplnej wielkiego pieca należy podwyższyć temperaturę powietrza dmuchu lub obniżyć jego wilgotność. Ciepło jawne dmuchu lub ciepło tracone na reakcje rozkładu wilgoci dmuchu powinno wyrównać brak ciepła spowodowany wdmuchiwaniami paliwa zastępczego. W tym przypadku bilans cieplny w strefie dysz

wielkiego pieca nie zostaje naruszony i piec pod względem cieplnym może pracować tak samo efektywnie jak przy spalaniu koksu.

Ilość koksu, jaką można zaoszczędzić wprowadzając do wielkiego pieca 1 kg paliwa zastępczego, określa się wskaźnikiem zamienności. Wskaźnik ten jest związany ze składem chemicznym paliwa i jest niezależny od warunków pracy pieca.

Obliczenia teoretyczne pozwoliły ustalić następujące wskaźniki zamiany (kg/kg) dla podstawowych paliw zastępczych:

metan	1,12
olej	1,10
węgiel (8% popiołu)	1,01
gaz koksowniczy	0,58

Współczynniki zamiany dla gazu ziemnego i olejów są korzystniejsze niż dla węgla. Ogólna oszczędność koksu jest jednak tym większa, im większa jest ilość wdmuchiwanego paliwa, oczywiście przy założeniu, że strefa spalania będzie zdolna spalić tę ilość paliwa.

Na podstawie danych zawartych w tabl. 6 można stwierdzić, że paliwa zastępcze gazowe powodują zmianę przebiegu spalania obniżając silnie temperaturę płomienia, wymagają dużej ilości koksu dla regeneracji powstałych produktów spalania oraz znacznie zwiększają ilość gazów powstających w komorze spalania.

X.2.1. Wdmuchiwanie gazu ziemnego

Gaz ziemny zawiera 90-95% metanu. Gaz ten wprowadza się zwykle do kanału pierścieniowego znajdującego się w podstawie dyszy, a stąd jednym lub trzema otworami wpływa do wnętrza dyszy i zmniejsza się ze strumieniem gorącego powietrza (rys. 21).

Reasumując, produkcja wielkiego pieca, bez podniesienia temperatury dmuchu., nie zmienia się lub w niektórych przypadkach wzrasta jedynie o 2-3%

Dodatkową zaletą związaną z wdmuchiwaniami gazu ziemnego do wielkiego pieca i obniżeniem zużycia koksu jest zmniejszenie ilości siarki w piecu.

X.2.2. Wdmuchiwanie oleju

Olej wdmuchuje się do wielkiego pieca za pomocą dysz o średnicy 6-9 mm umieszczonej w osi dyszaka ukośnie w odległości ok. 1000 mm od wylotu dyszy w garze. Podczas przeprowadzanych badań nad wdmuchiwaniami oleju zwrócono uwagę na konieczność dokładnego rozpylenia oleju dla uzyskania dobrego zmniejszenia kropli oleju z powietrzem i szybkiego ich przegrzania w celu uzyskania pełnego spalania w prądzie gorącego powietrza. Na podstawie badań przeprowadzonych w różnych hutach można wyciągnąć ogólny wniosek, że istnieje optymalna ilość oleju, którą można wprowadzić do wielkiego pieca z korzyścią dla poprawy wskaźników pracy pieca; jeśli przekroczy się tę ilość, to bieg pieca staje się oporny i wyniki jego pracy pogarszają się.

Ilość wprowadzonego oleju do wielkiego pieca jest ściśle związana z przewiewnością słupa wsadu, gdyż wraz ze zwiększeniem ilości oleju zwiększa się ilość przepływających gazów przez piec. Ilość oleju wprowadzonego do wielkiego pieca wynosi przeciętnie 40-80 kg/t surówki. Stwierdzono, że współczynnik zamiany koks-olej wraz ze wzrostem ilości oleju obniża się.

X.2.3. Wdmuchiwanie smoły.

Wdmuchiwanie smoły stosuje się doświadczalnie w 3 hutach: japońskiej, australijskiej i holenderskiej. Ze względu na dużą lepkość smoły przy temperaturze otoczenia stosuje się jej podgrzewanie do temperatury 100-150°C, co wymaga skomplikowanych urządzeń i dodatkowej aparatury kontrolno-regulacyjnej. Obliczenia teoretyczne wykazują, że dla wyrównania strat ciepła przy wdmuchiwaniu smoły należy podwyższyć temperaturę dmuchu podobnie jak dla oleju o 290°C na 100 kg smoły.

XI.2.4. Wdmuchiwanie węgla.

Wdmuchiwanie węgla do wielkiego pieca jest bardzo interesujące z punktu widzenia ekonomicznego. Szczegółowe opisy celu i systemu wdmuchiwania węgla przez dysze zawiera załącznik 1.(Ad.2.4.)

XI.3. Wzbogacanie dmuchu w tlen.

Wzbogacanie dmuchu w tlen zmniejsza ilość gazów przypadających na jednostkę wsadu, powodując zmniejszenie szybkości przelotu gazów przez piec i straty ciśnienia pomiędzy garem i gardzielą, dzięki czemu ilość spalonego koksu w jednostce czasu może być zwiększana. Wzbogacanie dmuchu w tlen wpływa na podwyższenie temperatury spalania w garze, co umożliwia wytop bardzo gorących (chemicznie) surówek, a więc żelazokrzemu i bogatego żelazomanganu.

Istnieje również możliwość stosowania żużli o wysokiej zasadowości i dużej zawartości Al_2O_3 . Przy spalaniu koksu dmuchem wzbogaconym w tlen powstają gazy wzbogacone w CO o dużej zdolności redukcyjnej, dzięki czemu istnieje możliwość zwiększenia wskaźnika redukcji pośredniej w szybie wielkiego pieca, o ile tylko ilość gazów będzie dostateczna i zapewniony będzie ich prawidłowy rozdział na całym przekroju szybu. Zmniejszona ilość gazów oddaje szybciej swe ciepło wsadowi i temperatura gazów w gardzieli jest dlatego niższa niż przy dmuchu normalnym co oczywiście zmniejsza straty ciepłne na jednostkę surówki.

Dodatek tlenu do dmuchu wywołuje jednak również zjawiska ujemne jak np. zmniejszenie ilości ciepła jawnego dmuchu wniesionego do dysz i do komór spalania. Jeżeli temperatura dmuchu przy wzbogaceniu go w tlen nie zostanie podwyższona to ogólna ilość ciepła jawnego dmuchu zmniejszy się. Zwiększenie wskaźnika redukcji pośredniej na skutek wysokiej zawartości CO w gazach można zrównoważyć zmniejszeniem ilości gazów przepływających przez szyb i w wyniku tego nagrzanie wsadu schodzącego w dół może być zbyt małe. Przesunięcie stref wyższych temperatur w dół i wynikłe stąd nadmierne obniżenie strefy powstawania żużla pierwotnego aż do górnej części spadku może spowodować nierównomierność biegu pieca, zawisanie i oporny bieg, co również może zmniejszyć korzyści podwyższonego wskaźnika redukcji pośredniej.

Rzeczywisty wpływ wzbogacenia dmuchu w tlen na wzrost produkcji i jednostkowe zużycie koksu zależy więc w każdym przypadku od różnych czynników. W poszczególnych przypadkach osiąga się jedynie nieznaczną oszczędność koksu.

Stosowanie dmuchu wzbogacanego w tlen wpływa oczywiście również na przebieg spalania koksu. Wzbogacenie dmuchu w tlen powoduje wzrost temperatury w ognisku spalania, co wpływa na zwiększenie intensywności procesu spalania i powoduje skrócenie długości strefy spalania: przy zawartości dmuchu 30% O_2 strefa utleniająca ulega skróceniu (zmniejszeniu) do około 500 mm.

Wzbogacenie dmuchu w tlen okazało się bardzo korzystne przy równoczesnym stosowaniu nawilżenia dmuchu lub wdmuchiowaniu paliw dodatkowych. Wilgość wpływa na obniżenie temperatury w strefie spalania oraz na zwiększenie wymiarów komory spalania, co oczywiście poprawia warunki pracy pieca. Powstały z rozkładu wilgoci wodór wzbogaca gaz i przyczynia się do podwyższenia wskaźnika redukcji pośredniej. To samo uzyskuje się przy wzbogaceniu dmuchu w tlen i wdmuchiowaniu paliw zastępczych. Dodatek tlenu podnosi temperaturę w strefie spalania i zmniejsza ilość gazów wypływających z komór spalania, tym samym pozwalając na zwiększenie ilości wprowadzonych paliw zastępczych oraz na zwiększenie współczynnika zamiany.

X.4. Regulacja pracy wielkiego pieca przez zmianę ilości dodatku paliw zastępczych.

Dla utrzymania równomiernej pracy wielkiego pieca i wysokiej jakości surówki konieczne jest posiadanie dostatecznej ilości danych o aktualnych warunkach cieplnych i przebiegu redukcji w wielkim piecu, a w szczególności zapotrzebowania ciepła w dolnej części wielkiego pieca. Zwiększenie zakresu redukcji bezpośredniej w następstwie zmniejszenia się zakresu redukcji pośredniej w szybie wymaga zwiększenia ilości koksu na redukcję, co oczywiście powoduje zmniejszenie ilości koksu dla celów cieplnych. W tych warunkach ilość ciepła na 1 t surówki wytwarzanego przed dyszami maleje, podczas gdy zapotrzebowanie ciepła na pokrycie endotermicznej reakcji redukcji bezpośredniej wzrasta. Odwrotna sytuacja zaistnieje w przypadku, gdy ilość ciepła i temperatura w garze wzrasta.

Celem regulacji pracy wielkiego pieca jest utrzymanie warunków pracy pieca na stałym poziomie, w szczególności utrzymanie równomiernej temperatury gazów i wsadu. W przypadku odchyżeń od normalnego stanu należy podjąć jak najszybciej odpowiednie kroki zaradcze. Głównymi środkami przeciwdziałania jest modyfikacja następujących parametrów:

- stosunku C : Fe we wsadzie,
- temperatury i wilgoci gorącego dmuchu,
- zawartości tlenu w dmuchu,
- ilości wdmuchiwanego paliwa zastępczego.

Regulacja warunków pracy wielkiego pieca może być przeprowadzona przez zmianę każdego z tych elementów lub przez równoczesne działanie dwóch lub więcej elementów (zmiennych).

W tabl. 3-6 podano zestawienie sporządzone przez CNRM obecnie (CRM) wykazujące efekt działania zmiennych stosowanych do regulacji pracy wielkiego pieca. Z zestawienia tego wynika, że poszczególne zmienne wywierają różne działanie w różnych strefach wielkiego pieca. Należy również wziąć pod uwagę, że dla każdej z nich istnieje różny czas opóźnienia ostatecznego efektu. Dotychczasowa znajomość procesu wielkopieczowego może dać jedynie szacunkową ocenę stopnia opóźnienia efektu działania każdego z czynników regulujących.

Zmiana stosunku C : Fe we wsadzie ładownym do gardzieli wielkiego pieca dociera do garu dopiero po 8 godz i dopiero po tym okresie następuje powolny wzrost temperatury w garze i w spadkach, co w pełni może dać się odczuć dopiero po 24 godz.

Wzrost temperatury dmuchu zwiększa ilość ciepła wprowadzonego do garu i to natychmiast. Małe nawet jednak braki ciepła wymagają stosunkowo dużej różnicy temperatury dmuchu, co z kolei pociąga za sobą znaczne zmiany rozkładu temperatur wzdłuż wysokości pieca i wpływa na przemieszczenie powstawania żużla pierwotnego.

Zmiana dodatku wilgoci do dmuchu działa podobnie jak zmiana temperatury dmuchu, ale w przeciwnym kierunku. Wilgość zmienia jednak nie tylko temperaturę w komorach spalania, lecz równocześnie zmienia skład gazów redukcyjnych. Powstały z rozkładu pary tlen oddziałuje na przyspieszenie procesu spalania koksu, natomiast H_2 zwiększa zakres redukcji

pośredniej w szybie i gdy kilka godzin później wsad zejdzie do spadków, zapotrzebowanie ciepła na redukcję bezpośrednią maleje. Ten wtórny efekt ma mniejsze znaczenie, należy jednak założyć, że zmiana wilgoci w gorącym dmuchu o $10\text{g}/\text{Nm}^3$ odpowiada zmianie wskaźnika redukcji pośredniej za pomocą H_2 o około 2%.

Głównym efektem niedużych dodatków tlenu jest wzrost temperatury w strefie wytwarzającej i – w małym stopniu – wzrost wskaźnika redukcji pośredniej. Duże wzbogacenie dmuchu w tlen przyczynia się do wzrostu redukcji bezpośredniej.

Wdmuchiwanie olejów zwiększa zakres redukcji pośredniej. Tak np. 1 kg oleju zawiera taką samą ilość C jak 1 kg koksu, przy tej samej ilości dmuchu C oleju zużywa jednak część tlenu dmuchu i tym samym mniej spali się C koksu w jednostce czasu. W rezultacie będzie jednak więcej gazów na 1 t surówki; wzrost ilości moli H_2 będzie taki sam jak wzrost ilości moli CO, ale zdolność redukcyjna H_2 jest większa niż CO. Dodatek olejów w pierwszej chwili spowoduje spadek temperatury w komorach spalania i w garze. Dopiero gdy wsad powyżej strefy dysz odczuje działanie redukcyjne gazów wzbogaconych w H_2 i CO, wówczas nastąpi wzrost temperatury przed dyszami. Zwłoka w uzyskaniu pełnego efektu może wynosić do 16 godz. rys. 24. Wpływ gazu ziemnego i gazu koksowniczego jest w zasadzie podobny do olejów, choć różny w działaniu cieplnym i redukcyjnym. Rozkład metanu wymaga więcej ciepła niż rozkład węglowodorów zawartych w oleju; również ilość gazów powstających przy spalaniu metanu jest większa. Przy regulacji pracy pieca należy uwzględnić trzy czynniki, które powinny być kontrolowane:

1. dopływ ciepła do garu,
2. nasilenie redukcji bezpośredniej,
3. rozkład temperatur w słupie wsadu przez wpływanie na temperaturę w komorze spalania.

Każda stosowana kombinacja trzech zmiennych powinna mieć możliwość oddziaływania na powyższe czynniki biegu wielkiego pieca. Równoczesna regulacja temperatury gorącego dmuchu i dodatku tlenu jest np. bardzo efektywna dla zmiany dopływu ciepła i rozkładu temperatur, ale nie można jej stosować dla kontroli zakresu redukcji bezpośredniej. Dlatego potrzebna jest jeszcze inna zmienna, która zasadniczo zmieniałaby skład i ilość gazów redukcyjnych. Taką zmienna może być paliwo zastępcze lub wilgoć.

Ad.2.4. Wdmuchiwanie pyłu węglowego do wielkiego pieca przez dysze.

Rozdział ten potraktowano szczególnie szeroko jako bardzo ważny z ekonomicznego i technologicznego znaczenia dla procesu wielkopieczowego. W czasie studiów I stopnia niekonieczne jest poznanie wszystkich systemów wdmuchiwania pyłu do wielkiego pieca. Niemniej studenci mogą się z nimi zapoznać.

Wdmuchiwanie węgla do wielkiego pieca było najwcześniejszą formą wdmuchiwania paliw przez dysze, a pierwsze doświadczenia rozpoczęto we Francji przed 150 latami. Poza kilkoma nieudanymi próbami dopiero wprowadzono (we wczesnych latach sześćdziesiątych) z sukcesem wdmuchiwanie węgla. Później olej opałowy i gaz ziemny. Z nadejściem drugiego wzrostu cen ropy w późnych latach siedemdziesiątych w wielu zakładach wstrzymano wdmuchiwanie oleju i gazu ziemnego i powrócono do stosowania wyłącznie koksu.

Jednakże korzyści wynikające ze stosowania paliwa wdmuchiwanego przez dysze stały się oczywiste, a opanowanie technologii przygotowania węgla i pneumatycznego transportu zachęciło wielkopieczowników do wprowadzenia wdmuchiwania węgla do wielkich pieców.

Obecnie wiele krajów posiada układy wdmuchiwania węgla, z których olbrzymia większość to instalacje zabudowane po 1980 roku. Na większości pieców stosuje się węgiel zmielony do około 80% < 74 mikronów nazwa (PCI-system), ale również stosuje się węgiel granulowany (Wielka Brytania – Scanthorpe i Ravenscraig) tzn. zmielony w przybliżeniu w 95% , 2 mm nazwa (GCI-system).

Skład chemiczny i granulometryczny różnych węgli wdmuchiwanymi w dyszach przedstawia tabela 7.

Stosowanie wdmuchiwania węgla do wielkich pieców jest korzystne z następujących powodów:

- dla tych hut które mają deficyt koksu, węgiel jest tańszy niż kupowany koks z zewnątrz,
- dla tych hut, które rozważają budowę lub przebudowę koksowni kapitałowy koszt wyposażenia w instalacje do wdmuchiwania jest mniejszy od kosztu budowy koksowni,
- możliwość stosowania szerokiego zakresu, typów węgla łącznie z tanimi węglami niekoksującymi,
- połączony efekt wdmuchiwania węgla, ograniczenie ilości pary wodnej, podniesienie temperatury dmuchu i wzbogacenie dmuchu w tlen sumarycznie zmniejsza zużycie koksu w wielkim piecu i zwiększa jego wydajność.

Z przytoczonych rozważań wynika, że wdmuchiwanie węgla do wielkiego pieca jest bardzo pozytywne. Stąd też w niniejszej pracy podjęto temat przedstawienia warunków technicznych, technologicznych i ekonomicznych wdmuchiwania pyłu do wielkich pieców koncernu Thyssen Stahl AG.

Rysunek od 25 do 32 przedstawia istniejące systemy wraz z firmami, które te systemy stosują. W August Thyssen Stahl AG wdmuchiwanie węgla do wielkich pieców rozpoczęto w 1982 r. W oparciu o próby pilotowe wyposażono wielki piec nr 4 w Hamborn w zasilanie pyłem węglowym łącznie 30 dysz tzn. 15 dysz gęstym strumieniem (system Kütnera) i 15 dysz strumieniem rzadkim (system P. Wurtha).

Węgiel wdmuchiwany do wielkich pieców koncernu Thyssen Stahl AG pochodzi z Ruhrkohle. Mielenie węgla prowadzi firma Emscher Genossenschaft GmbH, w której Thyssen posiada odpowiednie udziały.

W koncernie August Thyssen Stahl AG do mielenia węgla stosuje się młyny pierścieniowo-kulowe produkcji Claudius Peters AG.

Powietrze zassane przez młyn, który transportuje pył do filtra jest ogrzewane i w ten sposób węgiel jest suszony. Stąd też proces przebiegający w młynie nazywa się suszeniem wraz z mieleniem.

Schemat węgla i pyłu węglowego do zbiorników na Wydziałach Wielkich Pieców w Hamborn, Ruhrory i Schwelgern pokazany jest na rys. 30 i 31 (w czasie gdy takie piece wszystkie istniały).

Schemat instalacji do wdmuchiwania pyłu węglowego do wielkiego pieca nr 1 w Schwelgern obrazuje rys. 32 jako przykład wdmuchiwania pyłu węglowego w Thyssen Krup S.AG..

W wyniku przeprowadzonych doświadczeń zdecydowano się wielkie piece w Thyssen-Krupie wyposażyć w gęsty system strumienia zasilania pyłem węglowym.

Po uruchomieniu urządzenia do wdmuchiwania pyłu węglowego przy wielkim piecu nr 4 w Hamborn prowadzono badania z różnymi rodzajami węgla. Rysunek 32 pokazuje różne rodzaje i ilości węgla, które dotychczas wdmuchiwano.

Obok ilości wdmuchiwanego pyłu węglowego interesujący staje się stosunek zamiany koksu/węgiel.

W tabeli 8 przedstawiono uzyskane zmiany: jednostkowego zużycia koksu od ilości wdmuchiwanymi paliw zastępczych, zmiany temperatury płomienia i zmiany parametrów dmuchu. Uzyskano również zależność, która dla warunków przemysłowych wynosi $\text{koks/węgiel} = 1,03$.

Tabela 8.

Parametry	Zmiana	Zmiana temp. płomienia [°C]	Zmiana zużycia koksu [kg/t sur]
------------------	---------------	------------------------------------	----------------------------------------

węgiel antracytowy	+100kg/t sur	-162	-91,0
węgiel o dużej zaw. części lotnych (≈30%)	+100kg/t sur	-218	-96,1
olej opałowy	+100kg/t sur	-321	-98,4
gaz ziemny	(+132Nm ³ /t sur)	-513	-82,6
dmuch:			
para wodna	+10g/Nm ³ dmuchu	-58	+7,7
temperatura 1000-1200°C	+100°C	+83	-15,5
wzbogacenie tlenem	+1%(powyżej 21%)	+54	-1,4

połączony efekt wdmuchiwanie węgla, ograniczenie ilości pary wodnej niezbędnej do regulacji procesu, podniesienie temperatury dmuchu i wzbogacanie dmuchu tlenem sumarycznie zmniejsza zużycie koksu w wielkim piecu i zwiększa jego wydajność przy stałym bogactwie wsadu ogólnego. Przyjmuje się, wg. danych światowych, że podwyższenie temperatury dmuchu o 1000°C (w zakresie 1000-1200°C) powoduje wzrost produkcji o 5,4%, a 1% wzbogacenia dmuchu w tlen zwiększa produkcję o 3,6%, natomiast wprowadzenie 100kg węgla antracytowego i o dużej zawartości części lotnych obniża produkcję o około 5%. Rekompensata tlenem i temperaturą dmuchu pozwala jednak na osiągnięcie wzrostu wydajności przy wdmuchiwanie węgla. Z uwagi na to, że węgiel powoduje mniejsze obniżenie temperatury płomienia od oleju i gazu ziemnego, można przy jednakowych parametrach temperatury dmuchu i wzbogaceniu tlenem wdmuchiwać większe ilości pyłu węglowego.

W warunkach zbliżonych do wielkiego pieca ustalono każdorazowo stosunek O/C przy spalaniu węgla oraz określono, że krytyczny, atomowy stosunek tlen/węgiel wynosi 2,1 co widać na rys. 33.

Przebieg krzywych wyraźnie wskazuje, że wraz ze wzrastającą ilością wdmuchiwanego pyłu węglowego następuje zbliżenie do krytycznego stosunku O/C i przy ilościach pyłu węglowego powyżej 150 kg/t surówki osiągalna jest krytyczna wartość 2,1.

Stwierdzono, że ilość pyłu gardzielowego rośnie (w stałych warunkach) wraz ze wzrostem ilości wdmuchiwanego pyłu. Ze zbliżeniem się krytycznego stosunku O/C przy około 140-150 kg pyłu węglowego/t surówki wzrasta ilość pyłu gardzielowego w wyniku niecałkowitego spalania pyłu węglowego.

W związku z tym możliwe są zasadniczo dwie drogi poprawy tego zjawiska:

- mieszanie różnych gatunków węgla lub zastosowanie materiałów dodatkowych (katalizatorów), które przyspieszają spalanie węgla przez skrócenie czasu zapłonu,

- zwiększenie dostawy tlenu dla poszczególnych ziaren celem uzyskania wcześniejszego zapłonu węgla w dyszach, co jest możliwym przez właściwe usytuowanie lanc do wdmuchiwania oraz ich odpowiednia konstrukcja.

W celu uzyskania całkowitego spalania cząstek pyłu tlenem zasadniczą rolę odgrywa konstrukcja lancy do wdmuchiwania. Badania prowadzono zarówno z lancami pojedynczymi, podwójnymi jak i współosiowymi (koncentrycznymi). W wyniku badań stacjonarnymi termoelementami rys. 34 umieszczonymi w dyszy ustalono rozkład temperatur przy wdmuchiwaniu pyłu węglowego za pomocą lancy pojedynczej i współosiowej.

Testowano różne typy lanc koncentrycznych. Okazało się, że ze wzrostem ilości tlenu węgiel najpierw się chłodzi i następnie następuje nagle spalanie, którego intensywność wzrasta ponownie z ilością tlenu. Także stało się jasnym, że przez wyciągnięcie lancy węgla w lancy koncentrycznej następuje lepsze przemieszczanie węgla i tlenu połączone z wcześniejszym zapłonem węgla.

Z porównania lanc wynika, że najlepsza z badanych jest lancą współosiową.

Powoduje ona najlepsze spośród badanych zmieszanie pyłu węglowego z tlenem i dmuchem a prawdopodobnie zapobiega zbijaniu pyłków, co daje najszybsze ich spalanie. Głównym celem wdmuchiwania pyłu węglowego do wielkich pieców jest osiągnięcie efektu ekonomicznego tzn. zmniejszenie kosztu produkcji jednej tony surówki wielkopiecowej. Jak wynika z obliczeń wykonanych w niniejszej pracy wdmuchiwanie pyłu węglowego do wielkiego pieca nr 1 w Schwelgern pozwoliło na obniżenie kosztu produkcji surówki o ponad 7%, a więc rocznie o ponad 50 mln wtedy marek niemieckich. Wiąże się to głównie z obniżeniem stopnia redukcji bezpośredniej i wzrostem redukcji pośredniej wodorem, co oszczędza paliwo. Także wiąże się to z niższą ceną węgla niż koksu.

Dalszy rozwój technologii wdmuchiwania pyłu węglowego do wielkich pieców ma na celu przede wszystkim:

- zwiększenie udziału pyłu węglowego w produkcji 1 tony surówki oraz
- utrzymanie dobrego zamiennika koksu/pył węglowy również przy dużym jednostkowym zużyciu pyłu (około 200kg/t surówki i więcej).

Współczynnik O/C i zawartość pyłu w gardzieli, jakość koksu itd. , sprawiają, że nie tylko w wielkich piecach koncernu Thyssen Krupp Stahl AG, ale także w innych wielkich piecach stosujących pył węglowy w świecie w ilość wdmuchiwanego pyłu węglowego natrafia na próg ilościowy około 200 kg/t surówki.

Przeciętnie całkowite zużycie paliwa (koksu+ pył węglowy) wynosi dzisiaj w Niemczech 480 kg/t surówki, przy czym poszczególne piece wykazują wartości pomiędzy 460 a nieco ponad 500 kg/t surówki. Zatem doszło się już stosunkowo blisko do wyznaczonych przez G. Heynerta minimalnych wartości zużycia paliwa 420 kg/t surówki.

W Europie Zachodniej niektóre piece jak nr 1 w Schwelgern (Niemcy), nr 4 w Dunkierce (Francja), nr 7 w Ijmuiden (Holandia) Queen Victoria w Hucie Scanthorpe (Wielka Brytania) osiągnęły już średnie miesięczne ilości wdmuchiwanego węgla 180-206 kg/t surówki.

Na nowy cel wdmuchiwania węgla w dużych wielkich piecach w ilości 250 kg/t surówki. Należy uwzględnić następujące czynniki, które wymagają dalszych badań:

- warunków spalania pyłu węglowego przed dyszami wielkiego pieca,
- jakości stosowanego koksu,
- jakości stosowanych materiałów żelazodajnych,
- rozmieszczenia wsadu żelazodajnego i koksu w gardzieli wielkiego pieca.

W świecie trwają również badania nad nowymi metodami wdmuchiwania pyłu węglowego – między innymi w palnikach plazmowych i tlenowych, a nawet w połączeniu z recyrkulacją gazu gardzielowego po pozabawieniu tego gazu dwutlenku węgla i ogrzaniu. Przeprowadzone doświadczenia z palnikami plazmowymi (Pirogas) przy wdmuchiwaniu węgla do wielkiego pieca w hucie Uckange (Francja) pozwoliły na wdmuchiwanie ponad 220 kg węgla/t surówki.

Trwają badania symulacyjne zastosowania palników paliwowo tlenowych, a zatem prowadzenie wielkiego pieca z czystym zimnym tlenem.

XII. 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 (mięknięcia). 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 (małą gęstość czyli dużą 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 wielkopieczowym podano w części I opracowania.

XIII. Związki szkodliwe w wielkim piecu, a niektóre stany awaryjne

XIII.1. Problem alkaliów, cynku i ołowiu w wielkim piecu.

Obecność alkaliów, cynku i ołowiu w wielkim piecu zawsze uważano za źródło trudności dla regularnej pracy wielkiego pieca. Wpływ ten uwidocznił się z większą ostrością szczególnie z chwilą wzbogacenia wsadów wielkopieczowych, a więc zmniejszenia ilości żużli oraz z chwilą zwiększenia intensywności pracy wielkich pieców.

Analiza narostów jednego z wielkich pieców po wygaszeniu pieca pozwoliła ustalić wykres pokazany na rysunku 35; przebieg poszczególnych krzywych przedstawia, na jakich poziomach występują poszczególne składniki.

Alkalia

Metale alkaliczne dostają się do wielkiego pieca w postaci tlenków, węglanów oraz głównie w postaci krzemianów w rudach, topnikach i w popiele koksu. Część alkaliów przechodzi do żużla i zostaje wraz z nim usunięta, część przechodzi w postaci pyłu do gazów i z nim ulatuje z pieca. Część wreszcie zostaje zaabsorbowana przez ogniotrwałe obmurze, a reszta krąży wewnątrz pieca. Za wyjątkiem więc tej części alkaliów, która przechodzi do żużla lub ulatuje z pieca z gazami, reszta powoduje trudności.

Analiza szeregu wielkich pieców w USA i Szwecji wykazała, że ogólna ilość tlenków alkalicznych w materiałach wsadowych wielkich pieców wynosi nieco poniżej 0,5; z tego Na₂O stanowi 40%, a K₂O 60%.

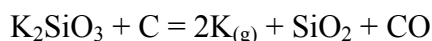
Ilość alkaliów, wprowadzonych do wielkich pieców wynosi 3,0-6,5 kg/t surówki; z tej ilości ok. 55% pochodzi ze spieku, 13% z grudek a 32% z koksu. W normalnych warunkach ponad 90% alkaliów może być wyprowadzone z pieca z żużlem, w tym przypadku reszta nie sprawia trudności; w niekorzystnych warunkach ilość wyprowadzonych alkaliów może obniżyć się do 70% i wtedy rozpoczynając się poważne trudności, tworzenie się narostów, nierównomierność biegu pieca itd. Ponieważ pozostające w piecu alkalia akumulują się, z upływem czasu narastające problemy stają się bardzo poważne. Charakteryzując ogólnie zachowanie się alkaliów w wielkim piecu, należy stwierdzić, że:

- związki alkaliczne pogarszają prace pieców, powodując zawisanie wsadu i tworzenie się narostów na ścianach pieca,

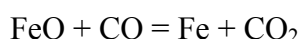
- obecność alkaliów zwiększa zużycie koksu i powoduje przenoszenie ciepła na wyższe poziomy w wielkim piecu; związki alkaliczne mają ujemny wpływ na reakcję Boudourda,
- ujemną rolę alkaliów jest powodowanie pęcznienia i rozpadu rud i grudek w trakcie redukcji; jest to jeszcze jedna z przyczyn unikania grudek we wsadzie w ilości ponad 25%, obecność nadmiernej ilości alkaliów w koksie sprzyja jego rozkruszaniu się w wysokich temperaturach,
- w wielkim piecu tworzą się cyjanki alkaliczne, które sprzyjają krążeniu alkaliów w wielkim piecu,
- alkalia działają niszcząco na materiały ogniotrwałe wielkich pieców i nagrzewnic.

Przebieg rozkładu i redukcji związków alkalicznych

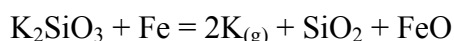
Krzemian sodu topi się w 1089° , krzemian potasu w 997°. Redukcja obu krzemianów w strefie rezerwy chemicznej zachodzi zgodnie z równaniami.



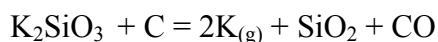
przyjmując , że w strefie rezerwy cieplnej wistyt znajduje się w stanie równowagi z fazą gazową, zgodnie z równaniem :



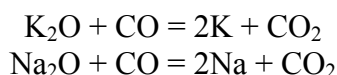
można przedstawić redukcję krzemianu za pomocą równania:



W strefie wysokich temperatur krzemiany alkaliczne redukują się za pomocą C w myśl równania:

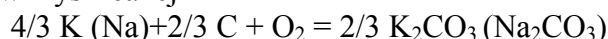


w oparciu o wartości standardowych energii swobodnych tworzenia się tlenków sodu i potasu można stwierdzić, że ich redukcja może łatwo przebiegać w temperaturach panujących w szybie za pomocą CO z powstaniem metalicznego potasu i sodu w myśl równań:

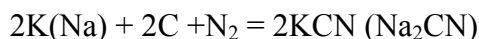


z równań wynika, że ciśnienie cząstkowe par metali alkalicznych zależy od stosunku CO:CO₂ w temperaturze 800°, czyli tuż powyżej punktu wrzenia potasu. Przy stosunku CO:CO₂ = 2,8 ciśnienie par potasu w stanie równowagi wynosi 0,55 at, co potwierdza możliwość szybkiej redukcji tlenków potasu, obecnych w szybie. Podobne wyliczenie dla Na₂O daje wielkość ciśnienia cząstkowego 0,06 at przy temperaturze 1000°, czyli Na₂O jest bardziej trwałe niż K₂O w szybie wielkiego pieca..

Węglan sodu i potasu topi się w temperaturze 850° lub 901°. Redukcja ich może nastąpić w zakresie temperatur 1000-1200°. Natomiast w temperaturze poniżej 900° może nastąpić tworzenie się węglanu w myśl reakcji



Powstałe węglany są w postaci pyłu i łatwo ulatują z gazami. W wielkim piecu w obecności azotu mogą łatwo powstać cyjanki w myśl reakcji.



Cyjank potasu topi się w 622° i wrze w 1625°, natomiast cyjanek sodu topi się w 562° i wrze w 1530°. Wobec tego cyjanki alkaliczne znajdują się w stanie ciekłym w dolnej części szybu

w spadkach i w garze, a w strefie dysz mogą istnieć w stanie gazowym. Cyjanki w temperaturze poniżej 1000° mogą ulec utlenieniu w obecności CO₂ w myśl równania.



Według różnych opinii reakcja utlenienia cyjanków zachodzi prawdopodobnie w szybie wielkiego pieca. Skondensowany KCN i K₂CO₃ pojawiają się w postaci bardzo drobnych pyłów, które osadzają się na zimniejszych kawałkach materiałów wsadowych oraz w górnych strefach szybu wielkiego pieca. Część która skondensowała się na materiałach wsadowych, schodzi razem z nimi i ponownie odparowuje po zejściu w strefę wysokich temperatur. Tylko część pyłów uchodzi z pieca wraz z gazem wielkopielowym. W ten sposób metale alkaliczne gromadzą się wewnątrz pieca w ciągu pewnego okresu czasu i przyczyniają się do trudności ruchowych.

XIII.1.1. Ujemny wpływ alkaliów na tworzenie się narostów i pracę wielkiego pieca

Podany poprzednio wykres obrazuje strefy, w których powstają narosty alkaliczne. Narosty powstałe przy współdziałaniu alkaliów w szybie są nietrwale i łatwo obrywają się, a schodząc do garu powodują jego oziębienie. W garze stwierdza się narosty alkaliczne pod dyszami. Alkalia osadzają się w porach cegieł i reagując z nimi tworzą krzemiany potasu. Uważa się, że główną przyczyną tworzenia się narostów są pary KCN w atmosferze utleniającej. Pary KCN nie powodują ożużenia obmurza w obecności tlenku węgla, natomiast łatwo utleniają się w obecności dużych ilości CO₂. Produkty utlenienia ożużają cegły, z biegiem czasu ten lepki żużel absorbuje dalsze alkalia i krystalizuje jako glinokrzemian potasu.

Pary KCN mogą przyczynić się również do redukcji tlenków żelaza, powodując osadzenie się na ścianach cienkiej warstwy żelaza metalicznego. Środkiem wiążącym narosty jest lepki żużel, utworzony wskutek działania par potasu na związki glinowe cegieł. W czasie zawisania pieca następuje gwałtowne wydzielenie się gazów bogatych w KCN, co przyczynia się do dalszego rozrostu narostów. Ruda, która rozpada się na proszek pod działaniem par alkaliów, również przyczynia się do powstania narostów. Wyraża się również opinię, że umocnienie narostów jest wynikiem oddziaływania węglanów alkalicznych, które rozpuszczają łatwo kwarc, topiąc się w niskich temperaturach.

Alkalia oddziałują ujemnie na materiały ogniotrwale. Ciekły KCN często przepływa w dół ścian szybu i spadków i przedostaje się w szczeliny między cegłami. Ciekły KCN reaguje z cegłami szamotowymi, redukując tlenki żelaza i rozpuszczając je. Jest również możliwe łączenie się par alkaliów w wolnym SiO₂ w cegłach ogniotrwałych. Uważa się, że widoczne jest również niszczące działanie alkaliów na cegły węglowe. Istnieje pogląd, że związki alkaliczne przenikają w stanie gazowym lub ciekłym do cegieł węglowych i podczas krzepnięcia rozszerzają się powodując pęknięcia. Dodatkową możliwością pęknięcia stwarza wydzielanie się gazów w czasie rozkładu węglanów alkaliów. Przy założeniu, że węglany tworzą się w cegłach z ciekłych i gazowych produktów alkalicznych, wahania temperatury w garze występujące w czasie pracy wielkiego pieca powodują osadzenie się i rozkład węglanów alkalicznych, czego wynikiem jest popękanie powierzchni cegieł.

Ubočnym efektem kondensacji cyjanków alkalicznych we wsadzie jest ogromne pęcznienie rud i grudek. Badania laboratoryjne wykazują, że w trakcie redukcji rozszerzalność grudek może wynieść nawet 80%. Cyjanki osadzają się również w porach i szczelinach koksu i powodują rozpad koksu w wyniku reakcji z tymi związkami. Alkalia osadzone w porach koksu zwiększają również znacznie jego reakcyjność, powodując wzrost zużycia koksu oraz zmniejszając jego wytrzymałość w wysokich temperaturach. Rozpad koksu i duże ilości krążących alkaliów mogą powodować powstanie znacznej ilości mialu zlepionego związkami alkalicznymi, co sprzyja wzrostowi oporów i wywołuje zawisanie pieca.

Duży udział alkaliów we wsadzie wielkopiecowym zwiększa rozchód koksu w wielkim piecu. Odparowanie związków alkalicznych w dolnej części pieca pochłania znaczną ilość ciepła w garze; ciepło to wydziela się w szybie w tak wysokich strefach, gdzie jest nieużyteczne.. Proces odparowywania alkaliów pochłaniający ciepło jest więc przyczyną oziębienia garu, co stwierdzono przy stosowaniu grudek o dużej zawartości alkaliów.

Regulacja ilości alkaliów w wielkim piecu

Usuwanie metali alkalicznych z wielkiego pieca odbywa się głównie przez żużel; mała ilość alkaliów uchodzi jako pył wraz z gazami. Szybkość usuwania alkaliów z gazami jest jednak ograniczona; mają one tendencję do obiegu krążącego wewnątrz pieca.

Bilans alkaliów wykazał, że ilość alkaliów, wyprowadzona z wielkiego pieca w żużlu, wynosi średnio 82%, w gazie 16%, a z pyłem 2%.

Stwierdzono, że przy stałej ilości żużla usunięcie alkaliów z żużlem zależy od temperatury w garze oraz od zasadowości żużla. Im wyższa temperatura w garze, tym mniej można wyprowadzić alkaliów w żużlu. Również im wyższa zasadowość żużla, tym mniejsza jest ich zdolność do wyprowadzenia alkaliów. Stwierdzono, że problemy związane z alkaliami są znacznie poważniejsze w piecach pracujących z małą ilością żużla aniżeli w piecach pracujących z dużą ilością żużla. Załączony wykres (rys. 36), opracowany na podstawie praktyki ruchowej szwedzkiej huty Oxelusund, podaje zależność usuniętych alkaliów z wielkiego pieca od zasadowości żużla określonego stosunkiem $(CaO+MgO):SiO_2$.

W niektórych zakładach stosuje się okresowe stosowanie $CaCl_2$ jako środka pomagającego do usunięcia alkaliów z pieca. Stwierdza się, że po załadowaniu chlorku wapnia do pieca ilość alkaliów w żużlu wzrasta. Uważa się również, że stosowanie $CaCl_2$ pomaga przy likwidacji narostów.

Mechanizm działania usuwającego nie jest jednak jasny. $CaCl_2$ topi się w temperaturze $772^\circ C$ wrze w $1935^\circ C$. Chlorek wapnia może reagować z materiałami wiążącymi, takimi jak cyjanki, węglany alkaliczne, zlepiającymi narosty, w wyniku czego wiązanie narostów osłabia się i może sprzyjać schodzeniu narostów. Ponieważ narosty zawierają rzeczywiście dużą ilość alkaliów, wyjaśnia to ich podwyższoną zawartość w żużlu w następstwie stosowania chlorku wapnia. Stosuje się również okresowe „płukanie” garów, polegających na okresowym przejściu na wsad o niższym bogactwie, przy równoczesnym pokwaszeniu żużli i stosowaniu dodatków upłynniających żużel, a więc rudy manganowej lub fluorytu.

XIII.1.2.Cynk i ołów w wielkim piecu

Związki cynku dostają się do wielkiego pieca w różnych materiałach odpadowych, wypałkach pirytowych i w dolomicie. Cynk występuje w postaci ZnO , $ZnCO_3$ lub $2Zn \cdot SiO_2$. Redukcja tlenku cynku przebiega łatwo w myśl reakcji $ZnO + CO = Zn + CO_2$ w temperaturze ok. $1200^\circ C$. Zn zredukowany przechodzi już w $906^\circ C$ w stan gazowy i unosi się wraz z gazami. Zn kondensuje w temperaturze 420° i osadza się na materiałach wsadowych lub na ścianach obmurza. Ta część, która osadziła się na kawałkach wsadu, schodzi ponownie w dół i odparowuje, krążąc w piecu z pochłanianiem ciepła i ze szkodą dla zużycia koksu.

Cynk osiadający na ścianach przyczynia się do utworzenia narostów. Zgodnie z poprzednio podanym wykresem narosty cynkowe tworzą się w górnej części szybu i dlatego ich usunięcie przedstawia trudności i niekiedy wymaga nawet strzelania. Część cynku może ulec utlenianiu w myśl reakcji $Zn+CO_2 = ZnO +CO$, przy czym cynk zwiększa swą objętość o ok. 20%, co wynika z dużej różnicy gęstości Zn i ZnO ($7,19$ i $5,66$ g/cm^3).

Główne działanie niszczące Zn i ZnO polega jednak na fakcie, że oba te składniki są katalizatorami rozpadu CO, a powstała przy tym sadza, osadzająca się w porach cegieł,

powoduje ich pękanie, a w utworzone w ten sposób szczeliny wchodzi dalsze ilości cynku; dlatego nieraz znajdują się między cegłami blachy cynkowe grubości do 15 mm. Obok czystego cynku – w blokach węglowych stwierdza się również, stop, zawierający ok. 96% Zn oraz Fe, Pb i Cu. W narostach ZnO występuje w postaci dobrze wykształconych kryształów zwykle obok sylwinu KCl, przy czym najwięcej cynku znajduje się w warstwach przylegających do cegieł.

W warunkach polskich hut do wielkiego pieca wchodzi cynk w ilości ok. 0,3 kg/t surówki. W warunkach normalnej pracy pieca z tej ilości do surówki przechodzi 0,165 kg/t sur., do żuźła 0,075 kg/t, do pyłu 0,05 kg/t sur. Stwierdzono, że w przypadku, gdy ilość Zn we wsadzie przekroczy 0,3 kg/t sur, część cynku pozostaje, krążąc w piecu lub osadzając się na ścianach. Okresowe obrywanie się narostów objawia się oziębieniem pieca i znacznym wzrostem ilości Zn w surówce i w żuźlu; w czasie spustu widoczny jest wtedy na strudze surówki gęsty biały dym, powstający ze spalania Zn wyphywającego ze surówką z pieca. Dlatego niekiedy stosuje się przepłukiwanie pieca CaF_2 , co ułatwia chłodzenie narostów jeszcze w trakcie ich powstania i w ten sposób uprzedza się i unika gwałtownego obrywania się narostów.

Jedynym sposobem uniknięcia trudności z cynkiem jest jego ograniczenie we wsadzie wielkopieczowym. Dlatego w warunkach polskich zmniejsza się we wsadzie ilość dolomitu oraz część pyłu wielkopieczowego wyprowadza się okresowo ze wsadu. Usunięcie cynku w procesie spiekania w przypadku wytwarzania spieku samotopliwego ma małe znaczenie, a stopień usunięcia cynku wynosi zaledwie 15%.

Ołów dostaje się do wielkiego pieca w postaci PbS lub PbSO_4 * PbS jest łatwo redukowany za pomocą Fe w zakresie temperatur 1000 – 1200°C. Pb dzięki wysokiemu ciężarowi gatunkowemu osiada na trzonie pieca i częściowo wyphywa z pieca wraz z surówką, częściowo jednak wciska się w pory i szczeliny obmurza trzonu i garu i wnika aż do fundamentu pieca. Pb jest więc szczególnie szkodliwy dla obmurza trzonu wielkiego pieca. Mała część ołowiu przyczynia się do umacniania narostów, albo krąży wraz z cynkiem w szybie pieca.

XIII.2. Zjawisko zarastania garu i palenia się dysz

Zjawisko zarastania garu występuje szczególnie przy stosowaniu słabego koksu, spieku zawierającego znaczne ilości mialu oraz przy żuźlach o wysokiej zasadowości; zarastaniu garu sprzyja również zbyt wysoka temperatura płomienia w komorze spalania.

Zarastanie garu jest związane ze schodzeniem w dół niedostatecznie przygotowanych i zredukowanych mas; jest to następstwem tworzenia się narostów okresowo obrywających się szybko schodzących w dół. Do tworzenia się narostów przyczyniają się obok słabego koksu i mialu w rudach i w spieku, alkalia i cynk; również obecność we wsadzie trudno redukcyjnych rud i spieku o wysokiej zawartości FeO sprzyja powstawaniu trudności biegu pieca. W intensywnie pracujących wielkich piecach warunki dla redukcji są trudne i dlatego trudno redukcyjne rudy stwarzają możliwości oziębienia i zawisania pieca. Niska wytrzymałość koksu powoduje jego rozkruszanie się w wielkim piecu i powstanie znacznych ilości mialu. Duża zawartość drobnego mialu powoduje gromadzenie się go na granicy strefy wirowania, co utrudnia prawidłowy przepływ gazów w kierunku osi pieca i w następstwie tego zwiększa się przepływ gazów w górę komory spalania, wskutek czego strefa wirowania powiększa się szczególnie w kierunku do góry. W efekcie mialkiego koksu występuje gwałtowny wzrost ciśnienia dmuchu, wymagający obniżenia jego ilości. Niemniej ważną przyczyną zarastania garu i przepalanie się dysz, trudności przebijania żuźłówek i spustów żuźła oraz obecność surówki w żuźlu, widoczne jest również wyphywanie wraz z żuźlem znacznych ilości grafitu i mialu koksowego.

Po likwidacji zarastania garu pochyłe dysze kierują strumień ducha w dół, zapewniając dzięki temu przegrzanie i roztopienie narostów na ścianach garu poniżej dysz. Działanie pozytywne pochyłych dysz należy wyjaśnić następująco koks wstępuje do strefy spalania zarówno z góry, jak i z dołu (rys. 37), ten ostatni kierunek jest możliwy dlatego, że koks jest odpychany ku ścianom w wyniku nacisku słupa wsadu o większej masie właściwej. Ruch koksu od osi ku ścianom garu oraz kształt komory spalania odgrywają znaczną rolę w procesie zarastania obrzeżnej strefy garu, choć oczywiście zachodzi on ze stosunkowo małą szybkością. Tworzący się w garze miał koksowy i wydzielający się ze surówki grafit osiadają na warstwie żużla i pozostają w nim przytrzymywane kawałkami koksu. Pewne ilości miału koksowego i grafitu mogą wypłynąć z pieca wraz z żużlem, co uwidacznia się w czasie spustów szczególnie dolnego żużla. Znaczna część miału i grafitu jest jednak wraz z żużlem odciskania ku ścianom pieca. Jego obecność w żużlu powoduje zagęszczenie i zmniejszenie płynności żużla i w ten sposób nalepia się on ścianach szczególnie pod obsadami dysz. Takie narosty są widoczne pod obsadami dysz przy rozbiórce pieców w czasie kapitalnych remontów.

Opisany proces zarastania garu potwierdza charakter przepalania się dysz powietrznych w okresie zarośniętego garu. Dysze przepalają się głównie, gdy krople surówki spływają z góry, natomiast w przypadku zarośniętego garu przepalanie widoczne jest od dołu i z boku dyszy. W przypadku stosowania dysz pochyłych mechanizm zasysania żużla z dołu, widoczny na rysunku 38, jest inny i dlatego powstanie narostów pod dyszami nie ma miejsca. Innym sposobem, zapobiegającym zarastaniu garu i przepalaniu się dysz, jest okresowe przepłukiwanie pieca, a w szczególności garu, bardzo rzadkimi żużłami o obniżonej zasadowości i z dodatkiem do wsadu, fluorytu. Ten ostatni wpływa na rozrzedzenie i upłynnienie żużli, a tym samym na wymywanie ścian garu.

Stwierdzono, że istnieje niewątpliwa zależność pomiędzy zasadowością i ilością żużla oraz zużyciem koksu a ilością przepalonych dysz (rys. 39). Wpływ zasadowości żużli wynika ze współzależności zasadowości i lepkości żużli. Zarówno żużle kwaśne, jak i zasadowości powyżej ok. 1,1 posiadają wyższą lepkość i tym samym większą tendencję do tworzenia narostów, a więc wywoływania opisanych poprzednio zjawisk. Dodatni wpływ ilości żużla na zmniejszenie ilości przepalonych dysz należy tłumaczyć tym, że w piecach o mniejszej ilości żużla przypada więcej alkaliów na jednostkę żużla; rozpuszczalność alkaliów przez żużel jest jednak ograniczona.

Stąd szkodliwe działanie alkaliów na tworzenie się narostów i ich obrywanie się jest silniejsze przy obniżonej ilości żużla. Należy również założyć, że zwiększenie ilości żużla ułatwia wypłukiwanie narostów na ścianach garu i tym samym zwiększa niebezpieczeństwo umocowania się narostów w garze. Dodatni wpływ zwiększonego zużycia koksu na ilość przepalonych dysz jest ściśle związany z poprzednim, a mianowicie zwiększony rozchód koksu przypada oczywiście na piece pracujące z większą ilością żużla, czyli automatycznie oba wykresy wyrażają właściwie to samo.

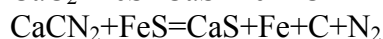
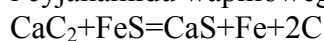
XIV. Odsiarczanie surówki poza wielkim piecem.

Technologia intensywnie pracujących dużych wielkich pieców zmusza do stosowania żużli o obniżonej zasadowości – posiadających niską lepkość i małą pojemność cieplną. Niska zasadowość żużli jest również korzystna w przypadku konieczności usuwania alkaliów. Praca taka nie sprzyja jednak dostatecznemu odsiarczaniu surówki. Z drugiej strony, niemożność odsiarczania w procesie konwertorowym zmusza do wytwarzania surówek o zawartości siarki w zakresie około 0,02%S. Konieczność zapewnienia wysokiej jakości surówki o niskiej zawartości siarki zmusza do stosowania w nowoczesnych zakładach wielkopiecowych odsiarczania poza wielkim piecem. Metody odsiarczania są przedmiotem badań od wielu lat. Do ciekłej surówki wprowadza się środki odsiarczające, mieszając je ze surówką

mechanicznie lub pneumatycznie. Uważa się jednak, że żadna z opracowanych metod odsiarczania nie jest właściwym rozwiązaniem w masowej produkcji, przy czym odgrywają tu rolę zarówno czynniki technologiczne, jak i ekonomiczne. Dobry środek odsiarczający powinien być tani, łatwy do wprowadzenia do surówki, wydzielać małe ilości dymów i drażniących pyłów, tworzyć trwały związek i reagować w sposób nie gwałtowny. Żużel z reakcji odsiarczania powinien występować w postaci stałej, a nie ciekłej, gdyż tylko to umożliwi łatwe oddzielenie żużla od ciekłej surówki i nie może wchodzić w reakcje zwrotne.

Niektóre środki odsiarczające.

Do środków odsiarczających, normalnie stosowanych i wypróbowanych w skali pełno-przemysłowej, należą soda amoniakalna Na_2CO_3 , karbid CaC_2 , cyjanamid wapniowy CaCN_2 , mag-coke, czyli koks magnezowy, desulf – tj. prasowane wióry stalowe z dodatkiem magnezu lub mag-dolo – sprasowana mieszanina magnezu i dolomitu, wapno palone często razem z metalicznym Al. oraz CaCl_2 , również w obecności Al. Wprowadzenie środków odsiarczających odbywa się przez wrzucenie do koryt lub wdmuchiwanie do strumienia surówki w korycie na hali, mieszanie z surówką w zbiornikach w komponowanych w koryta surówkowe, wdmuchiwanie lancą do kadzi, wrzucanie środka odsiarczającego do kadzi i mieszanie na niewielkiej głębokości warstwy surówki, a w przypadku magnezu lub koksu magnezowego zanurzanie go do kąpielii pod kloszem, lub wdmuchiwanie lancą. Wyniki odsiarczania za pomocą sondy amoniakalnej podają średnie zużycie sody w wysokości 1,7kg/0,01% zmniejszenia zawartości siarki na 1 t surówki. Pomiary wykazują, że burzliwość i objętość strumienia surówki wywierają znaczny wpływ na sprawność odsiarczania. Wdmuchiwanie pneumatyczne sody daje pozytywne efekty. Stosowanie sody w postaci proszku powoduje przykre pylenie, szkodliwe dla otoczenia dlatego chętnie stosuje się sodę w postaci pastylek lub jeszcze lepiej w postaci ciekłej. Odsiarczanie za pomocą węgla wapnia i cyjanamidu wapniowego zachodzi w myśl reakcji:



Powstały CaS nie rozpuszcza się w surówce a jego temperatura topnienia przekracza 2000°C 1kg CaC_2 ; teoretycznie wiąże 0,5kg ; w praktyce współczynnik wykorzystania CaC_2 wynosi 20%. Skuteczne odsiarczanie otrzymano przy zastosowaniu karbidu o ziarnistości 30-100mesh, natomiast karbid o uziarnieniu 10-15mesh daje złe wyniki, szczególnie przy pierwotnej zawartości S w surówkach ponad 0,07%. Karbid wdmuchuje się za pomocą lany, zanurzonej na głębokości 30 cm od dna kadzi. Stosowanie cyjanamidu jest łatwiejsze niż karbidu, gdyż ten ostatni w wilgotnym powietrzu rozkłada się i wydziela acetylen. Zachowanie tej ostrożności jest kosztowne. Wg. danych huty Sidmar stosowanie CaC_2 pozwala uzyskać zawartość S w surówce poniżej 0,01%. Wykres zależności zużycia CaC_2 na 1 tonę surówki i 0,01% usuniętej siarki w zależności od początkowej zawartości S w surówce podano na rys. 40.

Stosowanie cyjanamidu wapniowego w hucie Ijmuinden wydaje się być bardzo drogie; przy początkowej zawartości S 0,5% i końcowej 0,02% zużycie cyjanamidu wynosi 4 kg/t, podczas gdy zużycie CaC_2 wg. podanych wykresów ok. 3 kg/t. W przypadku stosowania CaC_2 pozostałe składniki surówki ulegają zmianie w nieznacznym stosunku, natomiast stosowanie cyjanamidu zwiększa zawartość azotu w surówce przykładowo z 0,013 do 0,025%. Stały żużel z odsiarczania zawiera żelazo w postaci śrutu, średnia jego ilość wynosi 50-60% masy żużla. Ściąganie żużla jest proste i odbywa się za pomocą pogrzebaczy ręcznych lub hydraulicznych. W czasie odsiarczania wydzielają się dymy i pyły, dlatego stosuje się odpowiednie urządzenia chwytające i oczyszczające. Wapno jest stosowane do odsiarczania surówki, ale trudno jest stosując wapno obniżyć zawartość S w surówce poniżej

0,03%. Przewiduje się odprowadzenie żużła powstającego w czasie odsiarczania tak aby nie dostawał się do kadzi. Dla zapewnienia dostatecznego stopnia odsiarczania czas przebywania surówki w korycie powinien wynosić ponad 60 sek. Łopatka wytrzymuje 4-8 spustów. Jako środek odsiarczający stosuje się wapno lub chętniej karbid. Jak wykazały badania w hutach RFN można uzyskać obniżenie S z 0,05% do 0,015% przy użyciu ok. 5kg karbidu na 1t surówki. Wykres na rysunku 40 podaje trzy proste określając zależność S przed i po odsiarczaniu przy dodatku karbidu 5-6kg/t, 9-10 kg/t i 13-14 kg/t. Z wykresu wynika więc stosunkowo duży rozkład karbidu.

Odsiarczanie magnezem.

Magnez jest uważany za najlepszy środek odsiarczający; z siarką tworzy siarczek magnezu, który wypływa na powierzchnię surówki. Magnez posiada niską temperaturę wrzenia; szybkie parowanie magnezu po dodaniu do ciekłej surówki wywołuje jej rozprysk. Magnez stosuje się w postaci mag-coke, w którym Mg jest osadzone cienką warstwą na powierzchni koksu w postaci mag-dolo a więc brykietów Mg z dolomitem wreszcie w postaci proszku Mg, wdmuchiwanego pod powierzchnię surówki do kadzi w strumieniu argonu. W systemie firmy Weaver, stosowanym w wielu hutach amerykańskich, bębny zawierające mag – coke umieszczone zostają w dzwonie grafitowym, przymocowanym do elektrody. Dzwony są zanurzone w surówce; wytrzymują do 30 odsiarczeń, a elektrody 100-200 odsiarczeń. Wyniki odsiarczeń w hutach amerykańskich podaje wykres na rysunku 40. Średnio 1 kg mag-coke (43%Mg) na 1 t surówki pozwala obniżyć zawartość S z 0,04% do 0,01%. Wdmuchiwanie proszku magnezu w strumieniu argonu natrafia na poważne trudności, gdyż lance łatwo zatykają się, co tłumaczy się parowaniem Mg i jego reakcją z azotem, przy czym powstaje Mg_3N_2 . Wdmuchiwanie trwa 8-10min przy zużyciu Mg 0-0,5kg/t sur. Wg. danych literatury odsiarczanie magnezem jest drogie. W 1974 r cena mag-coke wynosiła 5-5 dol/kg i stale ma tendencję zwyżkową. Cena $Mg_{97}=200-250$ mln/t czyli 1 kg =200.000-260.000 = 10USD/1kg Mg_{97} .

Czynniki odsiarczające.

1. Soda amoniakalna Na_2CO_3 1,7kg/0,01%S surówki (wrzucana lub pneumatycznie wdmuchiwana) dlatego stosuje się w postaci ciekłej lub pastylek.
2. Karbid – wdmuchiwany za pomocą lany zanurzonej na głębokość 30 cm od dna 1kg CaC_2 wiąże 0,5kgS ale praktycznie wsp. wykorzystania wynosi 0,2. Teoretycznie przy surówce 0,04 wystarczy 1kg-0,5kgS

$$x \quad -0,4kgS$$

$$x=0,8 \text{ kg } CaC_2 \text{ a praktycznie } 0,8:0,2 = 4kgCaC_2$$
3. Cyjanamid – nie stosuje się, zwiększa zawartość azotu w stali nawet do 0,025% pyli i dymi szkodliwe cyjanki, acetylen.
4. Wapno samo nie doprowadzą S w surówce do wartości poniżej 0,01.
5. Magnez – najlepszy ale wywołuje rozprysk i wybuchy. Wdmuchuje się go pod powierzchnię surówki za pomocą argonu. Żużel stały nie reaguje z wyłożeniem 1 kg Mg_{97} obniża S=0,04 do 0,005-0,007 lance zatykają się bo Mg paruje i reaguje z azotem Mg_3N_2 . Czas wdmuchiwania 8-10 min przy 0,5 kg Mg.

Wnioski.

Wg. opinii wyrażonych w publikacjach odsiarczanie poza wielkim piecem jest kłopotliwe i kosztowne –szczególnie w dużych hutach, ale niezbędne dla otrzymania surówek o zawartości poniżej 0,02%S. Spośród sposobów wprowadzania środków odsiarczających za najbardziej odpowiednie do przemysłowej instalacji uważa się wdmuchiwanie pneumatyczne do kadzi. Najbardziej korzystnym środkiem odsiarczającym wg. opinii jest karbid a na drugim miejscu magnez.

Reagenty odsiarczające.

CaO:

typ	Wapno miękkie, palone	
Zawartość CaO:	94,0%	
Zawartość CaCO ₃ :	2,0%	
Zawartość CaSO ₄ :	0,04%	
Strata przy prażeniu:	2,3%	
Wymiar cząstki:	100,0%	0,30mm
	99,95%	0,20mm
	97,0%	0,09mm
	93,8%	0,071mm
	86,4%	0,063mm
	77,4%	0,045mm
	Gęstość nasypowa:	850-910 kg/m ³ (luźny/sypki)

Wapno musi być dostarczane przy pomocy przewodu rurowego, aby zapewnić nieprzerwany przepływ. Typowym przykładem produktu jest Turbokalk, jaki zapewniany jest przez SKW Trostberg.

Odsiarczanie CaO i Mg łącznie stosowane we Francji zamieszczono na rys. 41.

Mg97.

Zawartość chemicznego Mg: 97%

Powłoka/pokrycie: 3%

Gęstość nasypowa: $\pm 1000 \text{ kg/m}^3$

Wymiar cząstki: 0,2-0,8%

Dystrybucja linearna

Produkt ten jest dostępny od wielu różnych dostawców. Typowym produktem tego rodzaju reagenta Mg 97 jest produkt dostarczany przez FOSECO- Austria, Pechuney- Francja i SKW- Niemcy.

XV. Intensyfikowanie procesu wielkopieczowego.

Podstawą współczesnej technologii wielkopieczowej jest stałość wszystkich parametrów, które mają wpływ na pracę wielkiego pieca, jego wydajność i jakość produkcji. Dotyczy to zarówno warunków wsadowych, jak i parametrów dmuchu, a więc jego ilości, ciśnienia (spadku) i temperatury, zawartości w nim H₂O, dodatku paliw zastępczych i tlenu do dmuchu. Tak określona równomierność ma szczególnie duże znaczenie dla wielkich pieców pracujących szybko i mało stabilnych cieplnie. Obecnie stosuje się szereg elementów intensyfikujących proces wielkopieczowy, poprawiających jego ekonomikę przez obniżenie zużycia koksu. Do pierwszej grupy należy zaliczyć podwyższenie ciśnienia w gardzieli oraz

dodatek pary wodnej i tlenu do dmuchu. Czynnikiem obniżającym zużycie koksu są wysoka temperatura dmuchu i dodatek paliw zastępczych. Niektóre z wymienionych czynników wpływają na rozwinięcie biegu obrzeżnego, inne znowu – środkowego. Jedne z nich powodują koncentrację „żaru” w garze, drugie natomiast przesuwają strefę wysokich temperatur ku górze pieca. Z tych też względów, obok zasady poprawy przewiewności wsadu wraz z intensyfikowaniem procesu, przyjęto stosować równocześnie dwa lub trzy czynniki intensyfikujące, których działanie wzajemnie się dopełnia. Zespół warunków wsadowych oraz parametrów technologicznych określa maksymalną przewiewność, to jest maksymalną ilość gazów przepływających przez piec, bez naruszenia płynności schodzenia wsadu. Przekroczenie tej granicznej wartości powoduje zawisanie wsadu i zarywkowy bieg pieca z tendencją do tworzenia się kanałów. Równocześnie ta wartość graniczna określa maksymalną wydajność pieca. W wielu wydziałach wielkopiecowych, zwłaszcza w USA, piece prowadzi się poniżej granicznych ich możliwości, ograniczając ich wydajność. W ten sposób zwalnia się bieg pieca, zmniejsza się szybkość schodzenia wsadu uzyskując obniżenie jednostkowego zużycia koksu. Przejście na pracę pieca z wysoką temperaturą dmuchu wiąże się ze zmianą kształtu komory spalania, podniesieniem temperatury spalania i zwiększeniem objętości gazów powstających w komorze spalania. Podwyższenie temperatury dmuchu zmienia przebieg krzywej temperatury wzdłuż wysokości pieca, powoduje koncentrację żaru w garze, z czym związane jest przesunięcie w dół strefy tworzenia się żużla pierwotnego oraz obniżenie strefy redukcji pośredniej. Znaczne zwiększenie ilości gazów w wielkim piecu przy niezmiennych warunkach przewiewności wsadu doprowadza do podwisania i zarywania się wsadu.

Dodatkowym czynnikiem utrudniającym pracę pieca w warunkach wysokiej temperatury dmuchu jest obniżenie zużycia koksu na tonę surówki, podniesienie obciążenia (R:K), a więc niekorzystne obniżenie przewiewności w wyniku zastąpienia części dobrze przewiewnego koksu rudą lub spiekami o znacznie gorszej przewiewności. Podnoszenie temperatury dmuchu wymaga:

- Wprowadzenia dodatku pary wodnej lub odpowiedniej ilości paliw zastępczych, które obniżają temperaturę komory spalania, dochowując tym samym niezmienną objętość gazów przepływających przez piec,
- Poprawy przewiewności wsadu, odsiewanie miała, pracę na wsadach o wąskich zakresach kawałkowatości, zbliżenie rozmiarów kawałków wsadu rudnego (spieku lub grudek) do rozmiarów kawałków koksu,
- Przejścia na bardziej obrzeżny bieg pieca przez zmianę poziomu i systemu załadunku.

Praktyka wielkopiecowa wykazuje, że dodatek pary do dmuchu pozwala na znacznie bardziej płynne schodzenie materiałów wsadowych niż to wynika ze stosowanego współczynnika (podwyższenie wilgoci w dmuchu o 1g/m^3 równoważy podwyższenie temperatury dmuchu o 9°C). Wynika to stąd, że dodatek do dmuchu pary wpływa na obniżenie temperatury w garze. Pozwala to na dotrzymanie niezminionej ilości koksu w dolnej części pieca, przez co zachowuje się dobre warunki przewiewności dolnej strefy pieca. Zastosowanie wysokiego ciśnienia w gardzieli zmienia radykalnie warunki przepływu gazów w wielkim piecu. Przy zachowaniu stałej ilości dmuchu przed i po wprowadzeniu wysokiego ciśnienia zmniejsza się zasadniczo ilość gazów wznoszących się od dysz w górę pieca, obniża się spadek ciśnienia między dyszami a gardzieli. Piec przechodzi na bieg silnie obrzeżny, któremu należy przeciwdziałać zmianą parametrów zasypu. W takiej sytuacji uzyskuje się znaczne obniżenie zużycia koksu przy niewielkim wzroście produkcji. Przejście na pracę o wysokim ciśnieniu w gardzieli przy zachowaniu dotychczasowego spadku ciśnienia pozwala na znaczne zwiększenie ilości dmuchu oraz wzrost produkcji pieca. Utrzymywanie niezmiennego spadku ciśnienia nie zmienia praktycznie rozkładu strug gazowych w przekroju pieca i umożliwia pracę w dotychczasowych warunkach załadunku pieca.

W praktyce wielkopiecowej zwykle nie stosuje się żadnej z przedstawionych możliwości. Przy przejściu na podwyższone ciśnienie obniża się nieco spadek ciśnienia (o 0,05 do 0,15 at) uzyskując jednocześnie wzrost ilości dmuchu. Praca pieca ulega poprawie, piec pracuje bardziej równomiernie bez skłonności do zawisań, z tendencją do biegu obrzeżnego. Tendencję tę likwiduje się zmianą parametrów zasypu. Równocześnie należy podnieść obciążenie (R:K) uzyskując mniejsze zużycie koksu i poprawę wydajności pieca w rezultacie zwiększenia intensywności pracy pieca i podniesienia stosunku R:K w naboju. Praca pieca na wysokim ciśnieniu ułatwia prowadzenie procesu, należy jednak przestrzegać zasady, że każdorazowe przejście z wysokiego ciśnienia na niskie (normalne) na dłuższy okres czasu wymaga równoczesnej regulacji rozkładu wsadu dla uniknięcia zaburzeń. Wysokie ciśnienie w gardzieli przynosi stosunkowo większe efekty przy wsadach miałkich i surowych niż przy wsadach dobrze przewiewnych i przygotowanych. Wynika to z faktu poprawienia przewiewności, przy podwyższonym ciśnieniu w gardzieli, co daje większe efekty przy nie przewiewnych wsadach.

Wprowadzenie paliw zastępczych obniża bardzo temperaturę komory spalania i zwiększa ilość gazów w wielkim piecu. Z tych względów wprowadzenie paliw związane jest z równoczesnym poważnym podwyższeniem temperatury dmuchu lub obniżeniem jego wilgotności. Przy wprowadzeniu do pieca gazu ziemnego do dmuchu wymaga podwyższenia temperatury dmuchu od 70 do 100°C lub odpowiedniego obniżenia wilgotności dmuchu. Zwiększenie ilości gazów w garze wymaga obniżenia ilości dmuchu i tak: w przypadku rekompensaty ciepła na rozłożenie gazu temperaturą należy na każdy 1 Nm³ wdmuchiwanego gazu obniżyć ilość dmuchu o 1,5 Nm³. Natomiast w przypadku rekompensaty wilgotnością dmuchu na każdy 1 Nm³ należy obniżyć ilość dmuchu o 0,5 Nm³.

Zasadniczymi warunkami uzyskania efektów wdmuchiwania gazu są:

- równy i sprawny pod względem technologicznym bieg wielkiego pieca przed wprowadzeniem gazu,
- dobre wymieszanie gazu z dmuchem, równomierne podawanie ilości gazu ziemnego na każdą dyszę albo – jeszcze lepiej – zastosowanie automatycznej regulacji rozdziału gazu ziemnego i dmuchu w dyszach wielkiego pieca,
- wcześniejsze obciążenie pieca przy założeniu, że na każdy procent dodanego gazu ziemnego do dmuchu należy podnieść R:K o ok. 4%.

Wprowadzenie tlenu do dmuchu powoduje przy zachowaniu stałej ilości gazów i podniesienie ich temperatury w komorze spalania. Tendencjom tym należy przeciwdziałać przez równoczesny z dodatkiem tlenu dodatek paliwa zastępczego. Przy stosowaniu gazu ziemnego przyjęto jako zasadę dodawać równocześnie na każdy 1 Nm³ tlenu od 0,3 do 0,5 Nm³ gazu ziemnego. Dla utrzymania niezmięnionej ilości gazów powstających w garze zmniejsza się równocześnie ilość dmuchu o 2% na każdy 1% wprowadzonego tlenu. Równoczesny dodatek gazu ziemnego przynosi w rezultacie także obniżenie zużycia koksu. Jak wykazała praktyka, współczynnik zamiany koks-gaz jest dla ilości gazu wprowadzonego z tlenem znacznie niższy i wynosi zwykle 0,5 kg koksu na każdy 1Nm³ gazu ziemnego. O tę wartość należy skorygować obciążenie. Dodatek tlenu powoduje mało dostrzegalną tendencję obrzeżnego biegu pieca, którą koryguje się systemami załadunku pieca.

Zależność zużycia koksu od intensywności biegu wielkiego pieca.

Dla oceny intensywności pracy wielkiego pieca korzysta się ze współczynnika wykorzystania objętości użytecznej wielkiego pieca i wskaźnika intensywności. Współczynnik wykorzystania objętości użytecznej wielkiego pieca wyraża wzór:

$$v_w = \frac{V_{uz}}{P} = \frac{v_m \cdot t}{24}$$

gdzie:

V_{uz} – objętość użyteczna wielkiego pieca, [m³]

P - dobowa produkcja, [t]

v_m - objętość materiałów wsadowych na 1 t surówki, [m³]

t - czas przebywania materiałów w piecu, [godz].

Z powyższego wzoru wynika, że współczynnik wykorzystania objętości użytecznej wielkiego pieca jest wprost proporcjonalny do czasu przebywania materiałów w piecu, przy stałych V_{uz} i v_m . Wskaźnik intensywności procesu jest związany z v_w następującą zależnością:

$$I = \frac{k}{v_w} = \frac{24 * k}{v_m * t}$$

gdzie: k – zużycie koksu, [t/t surówki}.

Współczynnik wykorzystania objętości użytecznej wielkiego pieca i wskaźnik intensywności procesu można również wyrazić w zależności od czasu przebywania gazów w piecu

$$v_w = \frac{v_g * V_{uz}}{24 * f * V} * k * t_g$$

gdzie:

t_g – czas przebywania gazów w piecu, [godz],

v_g – rzeczywista objętość gazu tworzącego się w wielkim piecu z 1t spalonego koksu, [m³]

f – objętość wolnych przestrzeni w piecu,

V – objętość pieca od poziomu zasypu do poziomu dysz, [m³].

Według badań Ch.G. Thibauta wzrost intensywności pracy wielkiego pieca o 1% wpływa na podwyższenie zużycia koksu o 0,3%. Zgodnie z tym O. Rice podał wzór zależności zużycia koksu od czasu przebywania gazów w wielkim piecu. Ze wzoru tego wynika, że im krótszy jest ten czas, a więc im bardziej intensywny bieg pieca, tym zużycie koksu jest większe.

Zużycie koksu $k = 1035 - 55 t$ lub $k = 1035 - \frac{165 * V_r}{K}$ gdzie:

t – czas, [sek],

V_r – objętość robocza wielkiego pieca ponad poziom dysz,

K – przewał dobowy koksu, [t/24 godz].

Również pomiary F. Paschala (rys.77) wskazują na wzrost zużycia koksu wraz ze wzrostem przewалу koksu (a więc ze wzrostem intensywności pracy wielkiego pieca). W szczególności krzywa 2 podająca wyniki pomiarów przy wsadzie zawierającym tylko spiek samotopliwy pozwala wyciągnąć wniosek, że przewiewny wsad pozwala na bardziej intensywny bieg wielkiego pieca. Przekroczenie optymalnej intensywności powoduje jednak wzrost zużycia koksu. G.A. Flierman i J.M. van Langen podali wykres oparty na teoretycznych obliczeniach oraz pomiarach ruchowych zależności zużycia koksu od czasu przebywania wsadu w wielkim piecu, który oczywiście jest równoznaczny z intensywnością pracy pieca. Z wykresu wynika, że im krótszy jest czas przebywania wsadu, a więc im bardziej jest intensywny bieg pieca, tym zużycie koksu jest większe (rys. 78).

Wskaźniki pracy wielkiego pieca.

W technologii wielkopiecowej zaleca się szczególnie kontrolować następujące wskaźniki technologiczne:

1. Bogactwo wsadu

$$B_{ws} = \frac{\left(\sum_{i=1}^n G_{R(i)} * \%Fe_{Ri} * 0,01 + \sum_{i=1}^n G_{T(j)} * \%F_{T(j)} * 0,01 \right) * 100}{\sum_{i=1}^n G_{R(i)} + \sum_{i=1}^n G_{T(j)}} \quad [\%]$$

gdzie:

- $G_{R(i)}$ – masa zużywanego (i) tworzywa żelazodajnego [kg/nabój]
- $G_{T(j)}$ – masa zużywanego (j) topnika lub odpadu [kg/nabój]

2. Obciążenie naboju koksowego

$$N_1 = (R / K) = \frac{\sum_{i=1}^n G_{R(i)}}{G_K} \quad \left[\frac{\text{kg} \text{rud}}{\text{kg} \text{koksu}} \right]$$

$$N_2 = [(R + T)] / K = \frac{\sum_{i=1}^n G_{R(i)} + \sum_{j=1}^n G_{T(j)}}{G_K} \quad \left[\frac{\text{kg} \text{rud} + \text{topników}}{\text{kg} \text{koksu}} \right]$$

gdzie:

- G_K – masa zużywanego koksu w naboju – [kg/nabój]

Uwaga! Dla dokładniejszych obliczeń często uwzględnia się masę pyłu uchwytanego WP i jego zawartość Fe w obliczeniach bogactwa wsadu i obciążenia występującą jako wartość ujemną.

3. Wskaźnik produkcji jednostkowej.

- a. z objętości użytecznej pieca (od pkt „0” technologicznego w gardzieli) do osi dysz
- b. j.w. ale do dna garu wielkiego pieca – wskaźnik z objętości całkowitej pieca.

Ad.a.

$$\text{Pr odju} = \frac{\text{produkcja} [\text{mg} / 24 \text{godz}]}{V_{WPU} [\text{m}^3]} \quad \left[\frac{\text{Mg}}{\text{m}^3} \right]$$

$$\text{Pr odjc} = \frac{\text{produkcja} [\text{Mg} / 24 \text{godz}]}{V_{WPC}} \quad \left[\frac{\text{Mg}}{\text{m}^3} \right]$$

gdzie:

produkcja – dobową produkcją surówki [Mg/24h]

V_{WPU} – użyteczna objętość WP [m³]

V_{WPC} – całkowita objętość WP [m³]

4. Wskaźniki KIPO

$$KIPO_{(1)} = \frac{1}{\text{prodju}} = \frac{V_{WPU}}{\text{Produkcja}} \quad \left[\frac{\text{Mg}}{\text{m}^3} \right]$$

$$KIPO_{(2)} = \frac{1}{Pr odjc} = \frac{V_{WPC}}{Pr odukcja} \left[\frac{Mg}{m^3} \right]$$

UWAGA! Wskaźniki użyte w pkt 3 i 4 są bardzo często używane dla prowadzenia osiągnięć na poszczególnych WP w różnym czasie lub porównania osiągnięć własnych w różnym czasie. Aby te porównania były prawidłowe należy skorygować produkcję (a przy porównaniu jednostkowego zużycia koksu te jednostkowe zużycie o wskaźniki przelicznikowe podane w dalszej części w załączniku).

5. Intensywność pracy pieca została już podana w poprzednim rozdziale.
6. Jednostkowe zużycie koksu lub paliwa całkowitego.

$$G_{Kjedn} = \frac{G_K [Mg / dobe]}{Pr odukcja [Mg / dobe]}$$

$$G_{paliwo} = \frac{G_K [Mg / dobe] + G_{pal} * Wspkorekty [Mg / dobe]}{Pr odukcje [Mg / dobe]}$$

Uwaga! Współczynniki korekty paliw zastępczych są podane w załączniku pod pozycjami 1,2,3,15.

Załączniki.

Przeliczniki do korygowania jednostkowego zużycia paliwa (koksu) i dobowej produkcji surówki przy zmianie parametrów technologicznych.

- I. Współczynnik dla korekty paliwa
 1. Gaz ziemny wysokometanowy $\pm 1m^3/t$ surówki = $\pm 0,9$ kg koksu/t surówki
 2. Gaz ziemny zaazotowany $\pm 1m^3/t$ surówki = $\pm 0,63$ kg koksu/t surówki
 3. Gaz koksowniczy $\pm 1m^3/t$ surówki = $\pm 0,45$ kg koksu/t surówki
 4. Bogactwo wsadu Fe we wsadzie ogólnym $\pm 1\%$ = $\pm 1,3\%$ zużycia dotychczasowego paliwa łącznie, czyli w przeliczeniu gaz wg. wsp I/1 na koks
 5. Temperatura dmuchu $\pm 100^\circ C$ = $\pm 2,2$ paliwa łącznie wg (4)
 6. Wysokie ciśnienie na gardzieli $\pm 0,1$ atm = $\pm 2\%$ paliwa łącznie.
 7. Popiół koksu paliwa $\pm 1\%$ = $1,2\%$ koksu
 8. H_2O w koksie $\pm 1\%$ = $\pm 1\%$ koksu
 9. H_2O w dmuchu $\pm 1g/m^3$ = $\pm 0,1$ koksu %
 10. Si surówki $\pm 0,1\%$ = $\pm 0,6\%$ paliwa łącznie
 11. Mn w surówce $\pm 0,1\%$ = $\pm 0,2\%$ paliwa łącznie
 12. FeO spieku $\pm 1\%$ = ± 1 kg paliwa łącznie
 13. Intensywność spalania $\pm 1\%$ = $\pm 0,3\%$ paliwa łącznie
 14. Udział spieku $\pm 1\%$ = $\pm 0,16\%$ paliwa łącznie
 15. Pył węglowy ± 1 kg/t surówki = $\pm 0,9$ kg koksu
 16. Odsiew spieku < 5 mm $\pm 1\%$ = ± 5 kg koksu
- II. Współczynnik dla korekty produkcji
 1. Bogactwo wsadu $\pm 1\%$ = $\pm 1,6\%$ produkcji dotychczasowej w przedziale ponad 50% Fe we wsadzie

2. Bogactwo wsadu $\pm 1\% = \pm 2\%$ produkcji dotychczasowej w przedziale ponad 50% Fe we wsadzie
3. Tlen dmuchu $\pm 1\% = \pm 2\%$ produkcji dotychczasowej
4. Temperatura dmuchu $\pm 100^{\circ}\text{C} = 1,5\%$ produkcji dotychczasowej
5. Popiół koksu $\pm 0,1\% = \pm 2,5\%$ produkcji dotychczasowej
6. Udział spieku $+ 1\% = + 0,2\%$ produkcji dotychczasowej
7. S koksu $+ 0,1\% = - 2,0$ produkcji dotychczasowej
8. Żużel $\pm 100 \text{ kg/t}$ surówki $= \pm 5\%$ produkcji dotychczasowej
9. Gaz ziemny $\pm 1 \text{ m}^3/\text{t}$ surówki $= \pm 0,1\%$ produkcji dotychczasowej
10. Si surówki $\pm 1\% = \pm 5\%$ produkcji dotychczasowej
11. Mn surówki $\pm 1\% = \pm 2\%$ produkcji dotychczasowej
12. Odsiew spieku $< 5 \text{ mm} \pm 1\% = \text{spieku} < 5 \text{ mm} \pm 1\% 2\%$ produkcji dotychczasowej.

XVI. Alternatywne rozwiązania dla części surowcowej zintegrowanych hut żelaza i stali.

Dla hut o wielomilionowych zdolnościach produkcyjnych nie ma dziś zbyt szerokiej i konkretnej alternatywy. Ich linia technologiczna bazuje na wysokowydajnych wielkich piecach i konwertorach tlenowych stąd konieczność istnienia i eksploatacji koksowni oraz spiekalni rud.]

Znacznie korzystniej i wielowariantowo przedstawiają się możliwości konfiguracji metalurgicznej w hutach o wydajności 1-1,5 mln ton stali rocznie. Tam coraz częściej znajdują zastosowanie alternatywne technologie w zakresie produkcji wsadu dla stalowni, tak surówki żelaza jak i innych materiałów zastępujących bądź uzupełniających złom stalowy. Jeszcze do niedawna technologie te ograniczały się do procesów redukcji bezpośredniej rud i produkcji żelaza gąbczastego które w formie gąbki lub brykietów jest stosowane w piecach stalowniczych, gł. piecach elektrycznych.

Dominujące w tym zakresie technologie: Midrex, HyL, Fior, Ironcarbide, Circofer prowadzone są w piecach szybowych w złożu stałym lub w warstwie fluidyzowanej reduktorem jest gaz. W innej grupie metod, takich jak SI/RN, DRC, Fastment, Inmetco itp. stosuje się reduktor stały w postaci węgla.

Dominują zdecydowanie metody redukcji gazem przy stosowaniu których wytwarza się ponad 90% światowej produkcji żelaza gąbczastego.

Jeszcze do końca lat 70-tych przewidywano że do końca XX wieku światowe zdolności produkcyjne instalacji redukcji bezpośredniej osiągną poziom 100 mln ton rocznie. Taki rozwój jednak nie nastąpił z dwóch podstawowych przyczyn:

- sytuacji energetycznej które pozwala na ekonomiczną produkcję żelaza gąbczastego tylko w rejonach gdzie SA tanie nośniki energii,
- nastąpił rozwój rynku złomowego oraz technik jego przerobu i przygotowania.

Obecnie opinie są już prawie zgodne, że produkcja żelaza gąbczastego nie jest alternatywą lecz uzupełnieniem dla produkcji surówki żelaza.

W roku 2000 zdolności produkcyjne wszystkich instalacji redukcji bezpośredniej wynosiły 44 mln ton a produkcja 21 mln ton, co oznacza że wykorzystywano tylko 60% zdolności urządzeń. Jednakże pojedyncze instalacje pracowały z wydajnością 100% i do roku 2008 przewidywany jest przyrost zdolności produkcyjnych o kolejne 12 mln ton. W Europie zachodniej produkcja żelaza gąbczastego w skali globalnej nie ma żadnego znaczenia przemysłowego.

W procesach stalowniczych zastosowanie żelaza gąbczastego może mieć wielkie znaczenie przy produkcji wysokojakościowych stali, szczególnie na wyroby płaskie wytwarzanej na

bazie złomu stalowego. Poza redukcją bezpośrednią rud, inną obecnie już dojrzała i technologicznie sprawdzoną drogą pozyskiwania wsadu dla stalowni – jest produkcja surówki żelaza poza wielkim piecem. Proces COREX wyszedł poza instalacje pilotową w Pretorii. Dwukrotnie większej wydajności instalacja pracuje od października 95 w hucie Pohang koncernu poco w Korei Południowej. Dalsze budowane instalacje są cz ęsto projektowane jako kompleksy zespolone z obiektami redukcji bezpośredniej wykorzystującymi gaz z Corexu. Przedstawione zestawienie ukazuje stan w zakresie pracujących i budowanych instalacji COREX.

miejsce	Stan obiektu	Wielkość jednostki	Prod. Roczna [tys.t]
ISCOR	Pracuje	C-1000	350
SALDANHA	Budowa	C-2000+DRI	650
JINDAL	Budowa	2xC-2000	1530
HANBO	Budowa	2xC-2000+DRI	1500
POSCO	Pracuje	C-2000	700

Innymi poza Corexem procesami produkcji surówki poza wielkim piecem są: Hismelt-instalacja pilotowa uruchomiona w 1993 roku w Kwikana w Australii, Dios – technologia tworzona w Japonii oraz CCF firmy Hugoovens w Holandii. Jednakże z w/w żaden poza Corexem procesów nie ma znaczenia przemysłowego.

Rosnące wymagania w zakresie ochrony środowiska naturalnego, wysokie koszty modernizacji i remontów odtworzeniowych istniejących mocy produkcyjnych w klasycznych częściach surowcowych hut, tj. koksowniach, spiekalniach i wielkich piecach oraz coraz mniejsza atrakcyjność pracy w tych wydziałach – będą często czynnikiem decydującym o wyborze rozwiązań alternatywnych w stosunku do tych, które uznawane są obecnie za klasyczne. Wybrane najważniejsze procesy alternatywne przy produkcji surowego żelaza SA zamieszczone schematycznie na rysunkach od 42 do 45.

XVII. Modelowanie procesu wielkopiecowego.

Obecny poziom wydajności nowoczesnych wielkich pieców w połączeniu ze stopniem technologii jaki został osiągnięty oraz wymagania stalowników odnośnie otrzymywania surówki o stałej jakości, zmuszają wielkopiecowników do ścisłej regulacji pracy tego urządzenia. Nie jest już możliwe pozostawienie biegu wielkiego pieca wyłącznie inicjatywie operatora, wynikającej z jego wiedzy teoretycznej i zdobytych doświadczeń praktycznych. Operator będzie zawsze skłonny do subiektywnej oceny stanu procesu i będzie podejmował subiektywne czynności odnośnie zmian tego stanu.

Z tego powodu wprowadzono systemy umożliwiające automatyczną kontrolę procesu. W bardzo ogólnym znaczeniu można powiedzieć, że: automatyzacja procesu wielkopiecowego polega na stworzeniu spójnego systemu odpowiednich modeli matematycznych i pomiarów, które umożliwiają wpływ na parametry pracy pieca, celem wyprodukowania surówki o odpowiedniej równomiernej jakości przy użyciu minimalnej ilości energii na jednostkę produktu wytopu. W ostatnich latach trzy główne funkcje procesu wielkopiecowego tj. redukcja, wymiana ciepła i przewodność zostały w znacznej mierze udoskonalone.

W chwili obecnej wiedza w zakresie przebiegu redukcji i wymiana ciepła pozwala – przy pewnych uogólnionych założeniach – na sterowanie procesem wielkopiecowym w tym zakresie.

Sterowanie procesem jest możliwe, jeśli dostępny jest ilościowy opis wewnętrznych mechanizmów tego procesu. Ten ilościowy opis nazywamy matematycznym modelem procesu.

Aktualnie istnieje następujący podział matematycznych modeli wykorzystywanych w ramach automatyzacji procesu wielkopiecowego:

- modele statyczne, przy czym najczęściej spotykanym jest ciągły model statyczny, oraz
- modele dynamiczne, wśród których najczęściej spotykanym jest ciągły model statyczny z elementami dynamiki,

Ciągły model statyczny.

ten typ modelu opracowano w celu uzyskania – w możliwie prosty i realny sposób – znajomości niektórych parametrów charakteryzujących proces. Parametry te obejmują:

- produkcję godzinową surówki,
- zużycie paliwa,
- stopień redukcji,
- temperaturę gazów przed dyszami,
- wskaźnik cieplny charakteryzujący redukcję SiO_2 z żużla, który jest bezpośrednio związany z zawartością Si.

Obliczenia tych i ewentualnie innych parametrów są oparte na znajomości klasycznych danych wejściowych, oraz na pewnej koncepcji funkcjonowania wielkiego pieca.

Zwykle przyjmuje się koncepcję, która przewiduje podział wielkiego pieca na trzy strefy tj:

- strefę przygotowawczą,
- strefę izotermiczną zwaną strefą rezerwy cieplnej – wewnątrz której istnieje strefa rezerwy chemicznej,
- strefę wytwarzającą zwaną strefą roboczą.

Zgodnie z tą koncepcją opisuje się następująco przebieg procesu wielkopiecowego:

1. w strefie przygotowawczej następuje wstępne nagrzanie wsadu schodzącego w dół pieca przez przemieszczający się w górę pieca gaz. W miarę wzrostu temperatury wsadu następują procesy odparowania i wydzielania wilgoci z wsadu, dysocjacja węglanów oraz wstępne procesy redukcji tlenków żelaza gazami.
2. w strefie izotermicznej, która stanowi przejście między strefami przygotowawczą i wytwarzającą, materiały stałe i gazy mają temperaturę rzędu 1270K, która jest ustalona przez reakcyjność koksu. Strefa ta charakteryzuje się zbliżoną temperaturą gazu i wsadu, a przez to zanikiem wymiany cieplnej. Prowadzi to z kolei do zaniku procesów chemicznych, czyli wymiany masy wsadem i gazem w tej strefie. Stąd w tym typie modelu strefa ta jest pomijana.
3. w strefie wytwarzającej następuje intensywne wymiany ciepła i masy pomiędzy gazem i wsadem. Dobiega do końca redukcja tlenków żelaza a materiały wsadowe topią się. Powstaje żużel i metal oraz zachodzą reakcje chemiczne pomiędzy żużlem i metalem.

Wychodząc z takiego schematu, funkcjonowanie wielkiego pieca można opisać za pomocą bilansów cieplnych i materiałowych, które stanowią algorytm procesu. Te bilansowe obliczenia można przeprowadzić w każdej chwili w sposób ciągły.

Model dynamiczny.

Opisany model statyczny ciągły ma tą wadę, że nie wyraża w funkcji czasu zależności przyczyny od efektu. Obecnie w dużych jednostkach wielkopiecowych posiadających dużą bezwładność cieplną i chemiczną, czasy reakcji wielkiego pieca na zmianę parametru wejściowego są wyrażone w godzinach jak nie w dziesiątkach godzin. Z tego powodu droga prowadząca do ustalenia modeli procesu polegała na opisie zjawisk w czasie, czyli w dynamice procesu. Wyróżnia się w tym przypadku dwa podejścia tj. doświadczalne teoretyczne.

Podejście doświadczalne przyjęto od 1964 r w różnych ośrodkach badawczych. Charakter sposobu postępowania:

1. w praktyce podejście to stosowano głównie w celu uzupełnienia statycznych modeli ciągłych elementami koniecznymi do sterowania procesem ze sprzężeniem zwrotnym,
2. określono praktycznie czas reakcji wielkiego pieca stosując systematyczne zakłócenia zmiennych wejściowych,
3. metodykę tą określa się jako identyfikację czynną obiektu, którym jest wielki piec,
4. wyniki identyfikacji służą jako sposób akcji przy automatycznym sterowaniu procesem wielkopiecowym.

Został zatem zrealizowany cel wprowadzenia elementów dynamiki do statycznego modelu ciągłego. Ten nowy model nazwano „modelem statycznym ciągłym z elementami dynamiki”.

Stwierdza się jednak, że wyniki uzyskiwane w badaniach – przy identyfikacji obiektu – są zgodne kierunkowo lecz rozbieżne podejściu ilościowym dla różnych pieców.

Identyfikację czynną należy prowadzić zatem oddzielnie dla każdego pieca. Wymaga to dużej liczby doświadczeń i dlatego podjęto próby opisu procesu wielkopiecowego za pomocą równań kinetycznych reakcji cząstkowych, zachodzących w wielkim piecu. Jest to typowe podejście teoretyczne do opracowania modelu dynamicznego.

Działanie modelu statycznego ciągłego z elementami dynamiki oparte jest na uprzednio omawianej koncepcji podziału wielkiego pieca na trzy strefy. Następnie, wychodząc z dających się zmierzyć wielkości wejściowych uzyskuje się wektor stanu opisujący z wystarczającą dokładnością chwilowy stan procesu.

Wektor ten określa się na podstawie zjawisk zachodzących w poszczególnych strefach wielkiego pieca. Znakowaną parą wartości tego wektora stanu są R_i i Q_{Si} , gdzie:

- R_i oznacza stopień redukcji bezpośredniej i odnosi się głównie do szybu,
- Q_{Si} oznacza wskaźnik cieplny dolnej – wytwarzającej – strefy wielkiego pieca.

Użyteczność modelu w praktyce zapewniły identyfikacje obiektu oraz algorytm „sterowanie”, umożliwiające prowadzenie procesu wielkopiecowego za pomocą zmian wartości zmierzonych tj:

- ilości paliwa zastępczego,
- zawartości H_2O w dmuchu,
- zawartości O_2 w dmuchu,
- stosunku węgla do żelaza we wsadzie, w gardzieli pieca.

Perspektywy automatyzacji wielkich pieców.

Trzecia funkcja procesu wielkopiecowego tj. przewiewność jest i będzie w przyszłości tematyką badań w zakresie pełnej automatyzacji. Aktualnie wiadomo, że przewiewność znacznie się zmienia w poszczególnych strefach wielkiego pieca, w zależności od wielu czynników. Stąd tradycyjne podejście podziału wielkiego pieca na trzy strefy nie jest adekwatne do obserwowanych zmian przewiewności w wielkim piecu. Ostatnio proponuje się podział wielkiego pieca na następujące strefy:

- strefę materiałów suchych, obejmująca gardziel i część szybu,
- strefę mięknięcia materiałów zwaną strefą kohezyjną,
- strefę mokrą – stopione tworzywa i stały koks,
- strefę dysz,
- strefę garu – pod dyszami,

oraz dąży się do uzyskania modeli matematycznych przebiegu procesów w tych strefach (modele cząstkowe).

Najbardziej zaawansowane badania i próby, a nawet aplikacje dotyczą modeli stref kohezijnej i dysz.

Badania przeprowadzone w Japonii a następnie w Niemczech (Schwelgern) dotyczyły strefy kohezijnej i przyczyniły się do lepszego poznania procesu. Stwierdzono, że kształt, wysokość i położenia tej strefy zależy m.in. od własności i rozkładu wsadu w gardzieli. Niezaprzeczalnie również stwierdzono, że parametry strefy kohezijnej wpływają znacznie na bieżące wyniki pracy pieca oraz na czas jego eksploatacji. W ostatnich latach powstały w Japonii, Niemczech, Belgii a obecnie w Polsce modele matematyczne służące do identyfikacji strefy kohezijnej. Modele te wykorzystują klasyczne pomiary a oprócz tego:

- rozkład temperatury i składu gazów wzdłuż średnicy gardzieli pieca,
- rozkład ciśnień i temperatur wzdłuż średnicy gardzieli pieca,
- rozkład ciśnień i temperatur wzdłuż wysokości pieca.

Obecnie dąży się do budowy modelu sterującego położenia strefy kohezijnej.

Polskie perspektywy dotyczące automatyzacji procesu wielkopiecowego pokrywają się ze światowymi i dotyczą:

- dalszego doskonalenia dynamicznego modelu,
- próby z modelem strefy kohezijnej,
- wykonanie modelu strefy dysz i mokrej wielkiego pieca.

Istnieje ścisła zależność prawidłowej pracy zarówno strefy przygotowawczej jak i wytwarzającej, bowiem utrzymaniu regularnego bez zaburzeń biegu wielkiego pieca wymaga stałości wskaźników redukcji pośredniej i bezpośredniej. Redukcja pośrednia wpływa na pracę górnej części pieca (szybu), natomiast redukcja bezpośrednia na pracę i stan cieplny dolnej części pieca tj. spadków i garu. W celu utrzymania na stałym jednakowym poziomie sumy zapotrzebowania ciepłą w dolnej strefie, należy przede wszystkim utrzymać stałą wielkość ciepła potrzebnego na redukcję bezpośrednią, a zatem utrzymywać stałą wartość stopnia redukcji bezpośredniej.

Z drugiej strony stopień redukcji bezpośredniej uzależniony jest od stopni redukcji pośredniej (suma trzech stopni redukcji w procentach wynosi 100). Wymieniane wielkości określane są z ilości całkowitego tlenu tlenków żelaza oraz z przebiegu poszczególnych reakcji redukcji. Zmiany stopni redukcji zależą od rozkładu gazu w szybie oraz jego zdolności redukcyjnej, ale przede wszystkim od redukcyjności stosowanych tworzyw żelazodajnych. Zdolność redukcyjna gazów zależy w dużej mierze od kawałkowatości i reaktywności (reakcyjności) koksu spalane go przed dyszami, natomiast redukcyjność tworzyw (głównie spieku) zależy w dużej mierze od jego uziarnienia.

Stąd też, celem głównym rozpoczętych w 1993 a kontynuowanych obecnie i w latach następnych jest:

- opracowanie algorytmu obliczania stopni redukcji w wielkim piecu,
- ustalenie zależności funkcyjnych stopni redukcji pośredniej od kawałkowatości stosowanego spieku,
- ustalenie zależności funkcyjnych zdolności redukcyjnej gazu od reaktywności koksu, a celem pomocniczym jest:
- określenie teoretycznych podstaw redukcji materiałów wsadowych w wielkim piecu,
- określenie udziału stopni redukcji pośredniej i bezpośredniej tlenków żelaza w wielkim piecu,
- opracowanie wytycznych do projektu algorytmu obliczania udziału redukcji pośredniej i bezpośredniej w wielkim piecu,
- opracowanie wytycznych do programowania, oraz rozwijanie modeli cząstkowych, co jest dzisiaj wykonywane.