Kazimierz MAMRO

Akademia Górniczo-Hutnicza

PROBLEMY TECHNOLOGICZNO-PRODUKCYJNE STALOWNICTWA

W oparciu o dostępne źródło literatury i własne analizy omówiono zagadnienia techniczne i technologiczne produkcji stali, które obejmują następujące procesy:
– wytapiania stali w procesie tlenowo konwertorowym,
– wytapiania stali w elektrycznych piecach łukowych,
– rafinację stali w procesie obróbki pozapiecowej,
– modelowania procesów stalowniczych.

Opracowanie podporządkowane jest weryfikacji ekonomicznej procesów metalur-gicznych oraz uzyskaniu dobrej jakości końcowego produkcji stalowni.

W procesie konwertorowym dalszy postęp i rozwój koncentruje się na technologii wytapiania, konstrukcji urządzeń i mechanizacji operacji technologicznych oraz na logistyce przepływów materiałowych.

W procesach elektrycznych zwrócono uwagę na zachodzące zmiany konstrukcji pieców łukowych w okresie lat 1970 do 2009, które doprowadziły do istotnej poprawy wskaźników:
– skrócenia czasu wytopu z 150 do 45 min,
– zmniejszenia z 550 do 320 kWh/Mg stali,
– zmniejszenia zużycia elektrod z 2,72 kg/Mg stali do 0,77 kg/Mg stali,
– wzrostu wydajności z 30 do 100–160 Mg/godz.

Dalszy postęp procesu elektrycznego ukierunkowany jest na:
– wstępne podgrzewanie wsadu żelazonośnego,
– skrócenie czasu ładowania pieców,
– technologię wytapiania mającą wpływ na wskaźniki ekonomiczne,
– technologię heterogenicznego przygotowania złomu.

Ciekłą kąpiel metalową wytworzoną w procesie elektrycznym lub konwertorowym poddaje się rafinacji w urządzeniach pozapiecowych jako ostatni zabieg technolo-giczny przed odlewaniem do wlewnic lub na urządzeniu COS.

Dalszy rozwój procesu obróbki pozapiecowej ukierunkowany jest na:
– logistykę operacji metalurgicznych zapewniających odpowiednią pojemność cieplną stali,
– monitoring procesu rafinacji,
– poprawę uzysku odtleniaczy i składników stopowych,
– doskonalenie metod modyfikacji i usuwania wtrąceń niemetalicznych,
– wprowadzanie metod on-line kontroli i sterowania procesem.

Na podstawie przedstawionych problemów i spodziewanych kierunków dalszego rozwoju technologii wytapiania i rafinacji stali wskazane zostały obszary badawcze, w których uczestniczyć powinny placówki naukowe, a w szczególności Instytut Metalurgii Żelaza.

Słowa kluczowe: proces tlenowo-konwertorowy, łukowy, obróbka pozapiecowa, postęp techniczny, problemy współczesnej metalurgii, obszary badawcze

TECHNOLOGICAL AND MANUFACTURING PROBLEMS IN STEELMAKING

Based on the available literature sources and analyses of theoretical solutions, this article contains the major technical and technological steelmaking-related issues and covers the following metallurgical processes:
– steelmaking in the oxygen converter process,
– steelmaking in the electric arc furnaces,
– steel refining in the secondary metallurgy process,
– modelling of steelmaking processes.

The whole study is subject to economical verification of the metallurgical process and obtaining high-quality final product by the steel melting shop.

In spite of the satisfactory state of technology, further progress and development in the converter process is focused on the following areas:
– melting technology,
– construction of equipment and modernisation of technological operations,
– materials logistics.

In the area of electric processes, attention was paid to the changes that occurred in construction of the arc furnaces between 1970 and 2009 and resulted in significant improvement in the following parameters:

Prof. dr hab. inz. Kazimierz MAMRO – emerytowany profesor Akademii Górniczo-Hutniczej, długoletni członek i przewodniczący Rady Naukowej Instytutu Metalurgii Żelaza im. Stanisława Staszica.

– *reduction in melting time from 150 min to 45 min,*
– *reduction in electric energy consumption from 550 kWh/Mg of steel to 320 kWh/Mg of steel,*
– *reduction in electrode consumption from 2.72 kg/Mg of steel to 0.77 kg/Mg of steel,*
– *increase in productivity from 30 Mg/h to 100-160 Mg/h.*

Further progress in the field of electric process is oriented at:
– *pre-heating of the iron-bearing charge for melting process,*
– *reduction in time of furnace loading,*
– *melting technology that affect the economical indicators,*
– *technology for heterogenic scrap preparation.*

The liquid metal bath produced in the electric or converter process is subject to refining in the secondary metallurgy equipment. This process is the last technological treatment before casting steel in the conventional manner or using the continuous casting machine. Further development in the secondary metallurgy is oriented at:
– *logistics of metallurgical operations in order to provide relevant heat capacity of steel,*
– *monitoring of refining process,*
– *further improvement in the yield of oxidisers and alloy components,*
– *improvement in methods for modification and removal of non-metallic inclusions,*
– *introduction of on-line process control methods.*

Based on the above-mentioned problems and directions for further development of the metallurgical process related to steel melting and refining the research areas were determined for the works the research and scientific institutions, including the Institute for Ferrous Metallurgy, should participate in.

Key words: oxygen converter process, arc process, secondary metallurgy, technological progress, development, research institute

1. WSTĘP

W niniejszym opracowaniu na podstawie dostępnych źródeł literaturowych oraz wykonanych analiz rozwiązań teoretycznych zestawiono ważniejsze zagadnienia poznawcze i technologiczne w zakresie produkcji stali, które powinny być śledzone i podejmowane jako podstawa oferty dla krajowego przemysłu hutniczego, a także dla rozwoju problematyki R&D w długofalowych planach IMŻ.

Współcześnie główne cele badawcze w stalownictwie, zestawione w tablicy 1 obejmują horyzont czasowy do 2030 roku, a więc około 25 lat. W USA już opracowuje się prognozy potrzeb badawczych nawet do 2050 roku, a w zakresie energetyki, żywności i ekologii nawet do 2060 roku. Opracowania te przedstawiają pozycje [1–41], zestawione w spisie literatury.

W 2008 roku w hutach z pełnym cyklem produkcyjnym (koksownie, wielkie piece, stalownie konwertorowe, cos i wydziały przeróbcze), a więc w oparciu o pierwotne źródła Fe w postaci rud produkowano ok. 50% stali, a w elektrycznych piecach łukowych, a więc w oparciu o wtórne źródła Fe w postaci złomu, pyłów itp. ok. 45% całkowitej produkcji stali, a pozostałe 5% wedle innych technologii hutniczych.

Stosunki te w 2020 roku nie są dobrze oszacowane, bowiem istnieje prawdopodobieństwo, że do przemysłu wejdą nowe metody otrzymywania żelaza i stali (np. metalurgia wodorowa, smelting-reduction i in.), które zmniejszą udział i rolę hutnictwa o pełnym cyklu produkcyjnym w globalnej produkcji stali. Związane to będzie również z zaostrzającymi się wymaganiami ekologicznymi w odniesieniu do hutnictwa żelaza i stali.

Można ocenić dzisiaj, że uwzględniając spadki produkcji hutniczej, związane z kryzysem światowym produkcja stali w 2020 roku utrzyma się na poziomie 2008 roku i przesunięciem się o ok. 5–10% udziału nowych metod bezpośredniego otrzymywania stali z rud i złomu. Specjalnie dużego znaczenia nabierze eliminowanie koksu i zastępowanie go węglem i gazowymi reduktorami z rosnącym udziałem w nich wodoru.

Całość podporządkowana weryfikacji ekonomicznej oraz uzyskania dobrej jakości produkcji [13–20].

W niniejszym opracowaniu przedstawiamy ważne zagadnienia dot. procesu tlenowo-konwertorowego i procesu wytapiania stali w elektrycznych piecach łukowych, meta-

Tablica 1. Główne cele badawcze w metalurgii stali

Table 1. Main research objectives in steel metallurgy

Problem	Cel	Horyzont, lata
Rozwój alternatywnych metod otrzymywania żelaza i stali i przerobu odpadów metalonośnych, rozwój metalurgii wodorowej	Oszczędzanie pierwotnego i odzysk wtórnego Fe	2015–2030
Kompleksowe metody zmniejszenia energochłonności istniejących urządzeń i procesów hutniczych	Oszczędność energii i poprawa ekologii, obniżenie emisji CO_2	2004–2020
Optymalizacja konstrukcji urządzeń hutniczych, zwłaszcza topiących i odlewających ciekłą stal	Wzrost wydajności, elastyczności wsadowej i sprawności energetycznej	2003–2012
Rozwój metod nadawania gotowych kształtów i wymiarów wyrobom stalowym, nowe technologie cos.	Wzrost uzysków, wydajności cos, oszczędność energii i materiałów, nowa jakośc	2002– 2018
Postęp w zakresie modelowania procesów, cykli produkcyjnych i narzędzi(także aparatów kontrolno-analitycznych) do sterowania i automatyzowania produkcji	Wzrost wydajności, uzysków, obniżenie zużycia energii i materiałów, spadek pracochłonności hutnictwa, polepszenie jakości wyrobów	2001– 2016

lurgii poza piecowej stali, a także modelowania procesów stalowniczych.

2. PROCES TLENOWO-KONWERTOROWY

Współczesny proces tlenowo-konwertorowy (skrót TK) stanowi podstawowy sposób masowego wytapiania stali. Proces ten osiągnął wysoki stopień „doskonałości techniczno-technologicznej" rozumiane j tutaj jako zapewnienie w sposób powtarzalny, przy wysokim współczynniku niezawodności dużej wydajności produkcji stali dobrej jakości przy niskich kosztach tej produkcji,

Pomimo zadowalającego stanu techniki metalurgii TK jeszcze nie zostały wyczerpane rezerwy jej doskonalenia. Dalszy postęp i rozwój procesu TK koncentruje się w następujących obszarach:
– technologii procesu wytapiania,
– konstrukcji urządzeń i mechanizacji operacji technologicznych,
– rozwój gospodarki i logistyki materiałowej.

W obszarach tych przy formułowaniu celów obowiązuje zasada: „ Należy uzyskać dobrą jakość stali przy stale malejących kosztach jej wytapiania".

Z zasady tej wynika nierozerwalne sprzężenie techniki i technologii z ekonomią produkcji stali (w tym także z wydajnością pracy, kształtującą wielkość zatrudnienia w hutnictwie żelaza) [20–23].

W odniesieniu do wydajności pracy, liczonej liczbą Mg stali surowej, wyprodukowanej w ciągu roku, przypadającą na jednego zatrudnionego w danej hucie można kierować się orientacyjną wartością tego wskaźnika na poziomie:
– 350–450 Mg/1 zatrudnionego/rok w krajach rozwiniętych gospodarczo,
– 200–300 Mg/1 zatrudnionego/rok w krajach rozwijających się gospodarczo,
– poniżej 200 Mg/1 zatrudnionego/rok w krajach gospodarczo zacofanych.

W procesie TK ważniejszymi zagadnieniami, oczekującymi rozwiązania są:
- Przygotowanie ciekłej surówki przeróbczej i innych materiałów wsadowych do procesu w taki sposób, aby nie tracić czasu i pojemności roboczej konwertorów na operacje, które nie muszą i nie powinny być prowadzone w konwertorze. Głównie chodzi o odfosforowanie, odsiarczanie i odkrzemianie ciekłej surówki. Sumarycznym efekt zastosowania właściwej metalurgii przedpiecowej dla TK szacuje się na ok. 10% wzrostu wydajności konwertorów i ok. 5–8 obniżenia łącznych kosztów produkcji stali.
- Wydłużenie żywotności wymurówki ogniotrwałej konwertorów, kadzi, lanc, otworów spustowych, gazociągów i innych urządzeń pomocniczych. Wymaga to zastosowania coraz lepszych materiałów ogniotrwałych oraz ich szanowania i osłaniania w czasie operacji wytapiania. Metody rozbryzgiwania odpowiedniego żużla na robocze powierzchnie wymurówki konwertorów i kadzi (tzw. Slag splashing) stają się w większości stalowni normalną praktyką produkcyjną. Oczekuje się, że podniesienie żywotności materiałów ogniotrwałych przynosi wzrost wydajności konwertorów nawet do 20% oraz obniżkę kosztów produkcji stali konwertorowej o 10–15%.
- Opracowanie nowej i udoskonalonej aparatury kontrolno-pomiarowej i analitycznej, niezbędnej do kontroli i sterowania przebiegiem procesu TK, zwłaszcza dla
  - *szybkich analiz metalu, żużla i spalin,*
  - *szybkich pomiarów temperatury, aktywności tlenu, węgla i siarki,*
  - *oceny stanu wykładziny ogniotrwałej metodami termowizyjnymi i laserowymi.*
- Brak dobrego, w miarę niezawodnego oprzyrządowania aparaturowego i analitycznego konwertorów jest główną przyczyną znacznych utrudnień i pełnego stosowania automatycznego sterowania procesem w oparciu o statyczne i dynamiczne modele procesu TK. Oprzyrządowanie to może być także wdrażane w elektrostalowniach. Korzyści ekonomiczne z zastosowania techniki kontrolnej i analitycznej mieszczą się i wynikają z podwyższenia całkowitej sprawności metody TK.
- Opracowanie komputerowych metod namiarowania wytopu i sterowania jego przebiegiem w oparciu o matematyczne modele procesu TK w formie statycznej (podpowiadacze dla wytapiaczy) oraz w formie dynamicznej (sterowanie automatyczne intensywnością świeżenia, położenia lanc, wprowadzania niezbędnych dodatków oraz określania momentu spustu bez konieczności stosowania niekorzystnych dodmuchów). Wprowadzanie takich modeli przy dostatecznym uzbrojeniu aparaturowym pozwala obniżyć całkowite koszty produkcji stali surowej o ok. 5– 8% przy wzroście uzysku ciekłej stali na spuście o ok. 3–5% oraz wysokiej trafialności ze składem chemicznym i wymaganą dla metalurgii kadziowej temperaturą ciekłej stali.
- Wyjaśnienie i opracowanie skutecznych metod mieszania ciekłych faz w konwertorze dla uzyskania wielu efektów z zastosowania dmuchu kombinowanego (poprawy żywotności wymurówki, lanc, otworów spustowych, gardzieli i traktów spalinowych oraz kotłów odzysknicowych), a także wdmuchiwania sproszkowanych reagentów.
- Opracowanie lub ulepszenie istniejących metod odcinania utleniającego żużla przy spuście stali z konwertora . Skuteczne odcięcie spływu do kadzi stalowniczej utleniającego żużla pozwala na uzyskanie:
  - *do 50% mniejszego zużycia odtleniaczy, zwłaszcza Al,*
  - *do 50% zmniejszenia zgaru dodatków stopowych, wprowadzanych w czasie spustu pod strumień stali do kadzi,*
  - *łatwiejszej regulacji żużla kadziowego dla dalszych operacji przygotowania stali w kadzi do odlewania na urządzeniu COS.*
- Opracowanie nowych materiałów żużlotwórczych dla konwertorów i pieców elektrycznych w oparciu o modyfikację żużla powytopowego. Materiałów, które znacznie przyspieszają tworzenie odpowiedniego żużla w czasie wytopu, a także umożliwiają Slag splashing. Wykorzystywać tu należy rozmaite materiały odpadowe z innych procesów hutniczych, ceramicznych, chemicznych oraz produktów odpylania gazów.
- Wprowadzenie sposobów podgrzewania ciepłem odpadowym złomu i innych stałych dodatków dla zmniejszenia zużycia ciekłej surówki, skrócenia czasu wytopu, zwiększenia żywotności wymurówki konwertora.
- Opanowanie i doskonalenia metod rozbryzgiwania ciekłego, zmodyfikowanego żużla na roboczą wymurówkę konwertorów i kadzi stalowniczych. Dzięki temu Slag splashing'owi można znacznie przedłużyć żywotność

kampanii konwertorów nawet do ponad 10000–15000 wytopów i obniżenie kosztów produkcji nawet o 20–30%.

- Opanowanie i ulepszenie technologii świeżenia przy stosowaniu niskiej zawartości Mn i Si w ciekłej surówce, a także technologii odzysku Mn i niektórych innych składników z żużla w końcowych stadiach wytopu w konwertorze (między innymi przez wdmuchiwanie przez odpowiednie dysze i lance pyłów metalonośnych).
- Rozpoznanie i opracowanie procesów usuwania szkodliwych domieszek takich jak arsen, cyna, miedź, antymon i innych w czasie wytopu oraz przy kadziowej obróbce ciekłej stali, przede wszystkim z wykorzystaniem wapnia i jego związków.
- Rozwój i ulepszenie procesów utylizacji gazów konwertorowych i ich technicznego wykorzystania dla poprawy gospodarki energetycznej huty.
- Wprowadzenie reglamentowania zużycia ciekłej surówki przez zastosowanie w konwertorach dopalania gazów lub wprowadzania palników tlenowo-paliwowych.
- Opracowanie nowych lanc tlenowych i oprogramowania komputerowego dla ich sterowania, Np. typu Lance-Set firmy Nupro Co [36].

Zestawienie powyższe obejmuje najważniejsze zagadnienia procesu TK, a w ramach każdego z nich wyróżnić szereg tematów szczegółowych, związanych z uwarunkowaniami danego kraju, danej stalowni oraz jej stanu techniczno-technologicznego.

Specjalną uwagę w planach na lata 2006–2012 poświęca się rozwojowi prac teoretycznych w zakresie przepływów mediów, wymiany masy i ciepła w rozmaitych procesach metalurgicznych oraz ich modelowania w oparciu o rozwiązania z teorii zbiorów rozmytych. Niektóre zagadnienia z tego zakresu zostaną omówione dalej.

3. WYTAPIANIE STALI W ELEKTRYCZNYCH PIECACH ŁUKOWYCH

Od momentu szybkiego rozwoju minihut w świecie obserwuje się ogromny postęp w elektrostalownictwie, a głównymi trendami tego rozwoju są:

- Nowoczesne konstrukcje pieców łukowych (dog Mouse, płaszcze wodne., otwory spustowe w trzonie, palniki paliwowo-tlenowe, zastosowanie prądu stałego i inne).
- Przygotowanie wsadu do wytopu, skracające ładowanie pieców, łącznie z jego wstępnym podgrzewaniem.
- Nowe technologie wytopu, obniżające zużycie energii elektrycznej oraz zmniejszające zużycie elektrod (tablica 2).
- Ulepszone procesy metalurgii poza piecowej, zapewniające w sposób elastyczny wysoką jakość i szeroki asortyment gatunków stali przy rosnącej wydajności pieców łukowych.

Innowacje w tych obszarach już dziś doprowadzają do tego, że wydajności pieców łukowych wzrosły z ok. 30 Mg/h do 100–160 Mg/h, zapewniając minihutom wielką elastyczność w zainwestowanych zdolnościach produkcyjnych. Równolegle z tym występuje stale rosnący popyt na złom żelazny, obok peletów DRI (direct reduction iron) główny materiał żelazodajny.

Ten wysoki popyt jest jedną z głównych przyczyn rozpoczęcia w wielu krajach (USA, Kanada, Niemcy, Francja, Japonia) coraz szerszych badań i prac rozwojowych w zakresie:

- Oszczędzania żelaza w gospodarce.
- Recyklingu wszelkich odpadów żelazonośnych i metalonośnych, dla odzysku metali.
- Rozwoju „bezodpadowych" technologii wytapiania surówki i stali (Np procesy smelting-reduction), które podnoszą równocześnie uzysk Fe. Podnosząc uzysk żelaza i innych metalicznych składników w wytopach w sposób bezpośredni obniża się koszty produkcji, zużycie energii elektrycznej i ogranicza się szkodliwe oddziaływanie huty dla otoczenia. Uzyskanie wysokiego uzysku przy tej samej ilości zużytej energii elektrycznej redukuje intensywność energetyczną procesu wytapiania a tym samym mniejszą intensywność emisji do otoczenia.

Prace badawcze dla elektrostalownictwa podporządkowane są zasadzie, stosowanej w USA i innych krajach, zwanej „ Power Utilization and Time Utilization" w skrócie **PUTU**, wyrażonej czasem wytopu w stosunku do mocy doprowadzonej do pieca.

Wysokie wartości PUTU uzyskuje się między innymi przez odpowiednie przygotowanie fizyczne i chemiczne wsadu metalicznego, zwłaszcza złomu, a także przez wstępne podgrzewanie wsadu stałego przed jego załadunkiem do pieca (Np. stosowanie gorących peletów DRI). W tym zakresie obok znanych już metod mechanicznego przygowania złomu dla pieców łukowych opracowuje się metody produkcji ciekłego wsadu (typu ciekłej surówki)

Tablica 2. Postęp techniczny w elektrycznych piecach łukowych

Table 2. Technological progress in electric arc furnaces

Rok	Czas wytopu, min	Zużycie energii elektrycznej	Zużycie elektrod	Innowacje
		kWh/Mg	kg/Mg	
1970	150	550	2,72	Piece UHP
1975	135	517	2,54	Metalurgia poza piecowa
1980	120	500	2,18	Płaszcz chłodzony wodą
1985	100	495	1,81	Spienianie żużla, lance tlenowe
1990	75	440	1,36	Pice kadziowe LF
1995	60	396	1	Manipulatory lanc
2000	55	375	0,82	Recyrkulacja spalin
2005	52	362	0,77	Podgrzewanie wsadu
średnie dane dla zasadowego pieca łukowego o pojemności 50 Mg				

z przeznaczeniem do jego przerobu w piecach łukowych (proces RHF – Rotary Heath Furnace).

Dla łatwiejszego rozdrobnienia złomu opracowuje się technologie heterogenicznego przerobu złomu gabarytowego, głownie w ciekłym azocie.

Obok powyższej problematyki badawczej dla elektrostalownictwa warte podjęcia i wdrożenia są następujące tematy:

- Określenie współczynników transportu ciepła dla różnych rodzajów złomu i innych składników wsadu stałego.
- Zbadanie wymiany ciepła oraz szybkości rozpuszczania się węgla i złomu w kąpieli metalowej.
- Poszukiwanie tanich metod separacji metali nieżelaznych ze złomu dla pieców łukowych.
- Opracowanie nowych technologii obniżenia zawartości siarki, fosforu, azotu i wodoru , wprowadzanych przez złom i dodatki stopowe.
- Opracowanie tanich metod podgrzewania stałego wsadu dla pieców łukowych oraz określenia jak fizyczna postać i temperatura tego wsadu wpływa na czas wytopu i uzysk ciekłej stali.
- Opracowanie modeli ciągłego ładowania peletów DRI i złomu oraz ciekłej surówki do pieców łukowych.
- Opanowanie metod wdmuchiwania proszków do kąpieli i zabezpieczenia odzysku oraz recyklingu cynku z takich materiałów.
- Opracowanie nowych, drążonych elektrod grafitowych z napełnieniem ich różnymi dodatkami dla pieców łukowych.
- Zastosowanie skutecznych osłon i pokryć, ograniczających utlenianie elektrod.
- Opracowanie „nadprzewodzących" elektrod dla pieców UHP.
- Poszukiwanie optymalizacji procesów w piecach łukowych z zastosowaniem sztucznej inteligencji.
- Komputerowe sterowanie wytopem i zużyciem energii elektrycznej w piecu łukowym oraz w metalurgii poza piecowej w oparciu o zintegrowany system sterowania procesami stalowniczymi.
- Optymalizacja PUTU dla pieców łukowych z zautomatyzowanym sterowaniem w oparciu o nowe analizatory gazów, metalu i żużla.
- Zastosowanie mikrofal do przygotowania wsadu metalicznego i innych dodatków w celu poprawy bilansów zużycia energii elektrycznej .
- Wdrażanie metod utylizacji żużla, spalin i pyłów z pieców łukowych dla przygotowania i opanowania technologii bezodpadowych w elektrostalownictwie.
- Poszukiwanie optymalizacji dopalania gazów w piecach łukowych.
- Zrównoważony rozwój stalownictwa z użyciem surowców w postaci biomasy i tlenków odpadowych.
- Rozwój metod termowizyjnych i laserowych do kontroli stanu i pracy agregatów metalurgicznych.
- Wykorzystanie pyłów z pieców łukowych do produkcji chemikalii i farb.
- Nowe konstrukcje pieców łukowych na prąd stały.

4. METALURGIA POZAPIECOWA STALI

Metalurgia pozapiecowa (skrót **MP**) stanowi obecnie i w planach przyszłościowych zasadniczy obszar badawczy. Rozwiązania w tym obszarze przynoszą bowiem z jednej strony wzrost wydajności, oszczędności energii i wzrost uzysku w agregatach topiących, a z drugiej strony zapewnia uzyskanie wymaganej jakości stali. Prace badawcze w MP prowadzone są tak w stalowniach konwertowych jak i elektrycznych, a także w odlewniach staliwa. Obejmują one zarówno tematykę dot. metalurgii kadziowej jak i problematyki w urządzeniach specjalnych (piecach kadziowych **LF**, urządzeniach próżniowych, urządzeniach elektrożużlowego przetapiania ESR i innych).

Głównymi trendami i problemami rozwojowymi w MP są:

- Logistyka operacji metalurgicznych w kadzi celem ich skrócenia i zachowania niezbędnej pojemności cieplnej stali.
- Procesy rafinacji ciekłej stali w kadzi i w urządzeniach specjalnych, tak aby uzyskać potrzebny gatunek i odpowiednie przygotowanie stali do odlewania na urządzeniu COS [22,34,35].
- Rozwój inżynierii wtrąceń niemetalicznych (skrót WN) dla uzyskania możliwie najmniej szkodliwej ich zawartości i postaci.

Wszystkie te problemy spinane są klamrami prac w zakresie:

- *Modelowania komputerowego, symulacji i automatycznego sterowania procesami w MP [25, 26, 32, 33].*
- *Rozwoju sensorów i aparatury kontrolno-pomiarowej, zwłaszcza aktywności tlenu i pomiaru temperatury, niezwykle potrzebnej i ważnej dla uzyskania wymaganej jakości oraz sprawności MP.*

Właściwa przeprowadzona MP pozwala na uzyskanie:

- Wzrostu wydajności konwertorów o 5–15%, a pieców elektrycznych o 10–20%.
- Oszczędność zużycia energii i paliw o ok. 10–20%.
- Oszczędność odtleniaczy i dodatków stopowych, nawet do 20%.
- Wzrost uzysku stali, ok. 3–5%, a także obniżenie ilości odpadów o ok. 3%.
- Wyraźne obniżenie kosztów robocizny i ogólnych kosztów produkcji stali.

Jako bardziej szczegółowe tematy z zakresu MP, wymagające rozwiązania należy wymienić następujące problemy:

- Rozwój technologii nawęglania i odwęglania oraz odazotowanie ciekłej stali.
- Opracowanie rafinacyjnych (odfoforowujących i odsiarczających) stopów i żużli kadziowych.
- Rozwinięcie metod elektrochemicznych analizy domieszek, zwłaszcza śladowych w stalach.
- Opracowanie skutecznych i kontrolowanych metod modyfikacji i usuwania WN, łącznie z ulepszaniem metalurgii argonowej (procesów AOD, VOD i mieszania argonem) [36].
- Wdrożenia skutecznych sposobów przedłużenia żywotności wymurówki kadzi i innych urządzeń (komór próżniowych, króćców w instalacjach próżniowych, zamknięć suwakowych, wylewów i innych).
- Wprowadzenia on-line kontroli i sterowania całością operacji MP (wykańczanie i rafinacja).
- Opracowanie procesów rafinacyjnych w piecach kadziowych, tak aby agregat ten nie tylko służył do podgrzewania ciekłej stali lecz także do jej wymaganego przygotowania metalurgicznego do odlewania [43].
- Wprowadzenie systemu monitoringu temperatury w kadzi dla zapewnienia niezawodności spustów z konwertorów oraz operacji MP [44].

- Nowe modyfikatory żużli kadziowych, oparte o karbid zmniejszające utleniające działanie tych żużli na rafinowaną w kadzi stal [36, 45–47].
- Wdrożenie skutecznych metod odcinania żużla z konwertorów i pieców łukowych, tak, aby ograniczyć natlenianie ciekłej stali i zmniejszenie zgaru dodatków stopowych.
- Zastosowanie magnetycznych bramek i zamknięć przy przepływie ciekłej stali.
- Skuteczne metody usuwania WN w kadziach pośrednich.

Większość wyżej wymienionej tematyki bazuje na rezultatach badań podstawowych, głównie z zakresu modelowania komputerowego procesów metalurgicznych. Krótką charakterystykę tych badań podano w następnym rozdziale.

5. MODELOWANIE PROCESÓW STALOWNICZYCH

Komputerowe modelowanie zjawisk i procesów metalurgicznych w metalurgii ekstrakcyjnej prowadzone jest w większości liczących się w świecie placówkach naukowych i zapleczu badawczym koncernów hutniczych [23–26, 30–35]. Także w Polsce prowadzi w wyższych uczelniach i instytutach hutniczych pewne tematy, związane z modelowaniem procesów stalowniczych. Badania te nie są jednak skoordynowane i dopiero w przygotowywanej Platformie Stali może uda się doprowadzić do właściwej koordynacji.

Dla aplikacji w stalownictwie szczególnie przydatne są rozwiązania i programy komputerowe w następujących dziedzinach:

- Obliczeniowej Dynamiki Płynów (**CFD** – Computational Fluid Dynamics), rozwijanej niezwykle intensywnie w USA, Kanadzie, Finlandii i Japonii oraz opartej o programy **FLUENT** i **FACTSAGE** [38].
- Metodach numerycznych przepływów w układach jednofazowych obejmujących:
  - *Bezpośrednią symulację numeryczną (DNS - direct numerical simulation), dostarczającą opis własności fizycznych i przepływów płynów jednofazowych.*
  - *Symulację przepływów z dużymi wirami (LES - large Eddy simulation) - oceniającą wpływ silnych i dużych zawirowań na charakterystykę przepływu płynów.*
  - *Modele Navier-Stokesa przy uśrednionych Liczbach Reynoldsa (RANS - Reynolds Average Navier-Stokes Model) - symulujące turbulentny ruch płynów z dużymi prędkościami; większymi niż przepływach typu DNS i LES.*

Tematyka w tym obszarze prowadzona jest obecnie w Finlandii (Uniwersytet Oulu), Szwecji (Lulea), Belgii (CRM-Liege), Włoszech (Cremona), Francji (IRSID Maizieres-lesMetz) i Niemczech (Freiberg, Aachen oraz Clausthal).

- Dynamice przepływów w układach wielofazowych rozwiązania z tej dziedziny są i będą stosowane do modelowania i opisu procesów w :
  - *Odpylnikach spalin agregatów hutniczych,*
  - *Spiekalniach rud,*
  - *Suszarniach tworzyw metalurgicznych i materiałów ogniotrwałych.*
  - *Mieszalnikach i separatorach sproszkowanych reagentów*
  - *Przy krystalizacji metali i żużli.*
  - *Projektowaniu kadzi, wylewów, króćców i komór próżniowych.*

W warunkach i profilu IMŻ należałoby uruchomić i opanować program komputerowy FLUENT, który stanowi niezbędne narzędzie do rozwijania prac z zakresu CFD.

- Metodach symulacji przebiegu reakcji chemicznych w procesach metalurgii ekstrakcyjnej z wykorzystaniem i rozwijaniem programów Thermocalc, Calcmos, FACTSAGEM z jego odmianami oraz **CEQCSI** (z IRSID).

Prace i rozwiązania z zakresu modelowania procesów metalurgicznych mają zastosowanie nie tylko do procesu TK, czy wytopów w piecach łukowych lecz także w MP i COS[48].

LITERATURA

1. American Iron and Steel Institute, Status of the Iron and Steel Industry Technology Roadmap, New York, September 2, 1997.
2. Childe, V. Gordon, "Early Forms of Society," in Charles Singer, E. J. Holmgard, and A. R. Hall, eds., The Oxford History of Technology, Vol. I, New York:Oxford University Press, 1954.
3. Council of Economic Advisors, Supporting Research and Development Promote Economic Growth: The Federal Government's Role, Washington,D.C., October 1995.
4. Cyert, R. M, and R. J. Fruehan, Meeting the Challenge: U.S. Industry Faces the 21st Century: The Basic Steel Industry, Washington, D.C.: U.S. Department of Commerce, Office of Technology Policy, December 1996.
5. "Databus: 21st Century Technologies," Investors Business Daily, December 11,1997.
6. Charles H., Richard St. Clair, John C. Lafrance, and Don Hillebran Meeting the Challenge: U.S. Industry Faces the 21st Century: The U.S. Automobile Manufacturing Industry, Washington, D.C.: U.S. Department ofCommerce, Office of Technology Policy, December 1996.
7. Industrial Research Institute, R&D Trends Forecast for 1998, Washington, D.C.,
8. Lawler, Andrew, "Easing the Squeeze on R&D," Science, Vol. 278, November 21,1997, pp. 1390–1392.
9. Lempert, Robert J., and James L. Bonomo, New Methods for Robust Science and Technology Planning, Santa Monica, Calif.: RAND, DB-238-DARPA, 1998.
10. Mowery, David C., and Nathan Rosenberg, "The U.S. National Innovation System, "in Richard R. Nelson, ed., National Innovation Systems: A Comparative Analysis, Oxford: Oxford University Press, 1993..
11. Rostow, W.W., Theorists of Economic Growth from David Hume to the Present: With a Perspective on the Next Century, Oxford: Oxford University Press, 1990, pp. 223–257.
12. Technology Vision and Research Agenda Group, Glass: A Clear Vision for a Bright Future, Technology and research agenda developped by representative of the glass industry, Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office, January 1996.
13. U.S. Department of Energy, American Iron and Steel Institute, and Steel Manufacturers Association, Steel Technology Roadmap, Washington, D.C.: December 2001.

14. U.S. Department of Energy, Department of Energy Metal Casting Competitiveness Research Act of 1990: Annual Report Fiscal Year 1995, Washington, D.C., 1995.
15. U.S. Department of Energy, National Renewable Energy Laboratory, The Motor Challenge, Washington, D.C., DOE/CH110093-247, February 1994.
16. ———, Industries of the Future: Energy Efficiency for Our Sustainable Future, Washington, D.C., 1995a.
17. ———, Beyond 2000: A Vision for the American Metalcasting Industry, September 1995b.
18. ———, "Technology Roadmap for the Metalcasting Industry," draft report, October 30, 1997a.
19. U.S. Department of Energy, Office of Industrial Technologies, ASM Heat Treating Society, and Metal Treating Institute, Heat Treating Industry Vision 2020: Heat Treating Industry of the Future, 1996.
20. Steel Industry Technology Roadmap: Barriers and Pathways for Yield Improvements, AISI,OCTOBER 7, 2003
21. Eur 21265: Technology Platforms- From definition of implementation of Common Research Agenda, Luxembourg 2004.
22. Praxair Surface Technologies: 1992–1999: Philosophy and Operating Results of Praxair EAF Post-Combustion Technology; Fundamental Aspect of Coherent Gas Jets.
23. EU : Steel Technology Platform: A new dynamic for the European Steel Sector. Brussel. March 12, 2004.
24. BFI: Process Automation Steelmaking, Dusseldorf 2006 in www.bfi.de
25. Voest-Alpine Industrieanlagenbau.: Kompetenznetzwerk fur metallurgische end umwelttechnische Verfahrensenwicklkung. KnetMET, 2006 FORSCHUNGSPROGRAM.
26. Siemens WAI: Innovation of Technologies 2006 : in www.vai.at
27. Sixth Framework Programme: 3 Metals & Alloys, Nano Road SME 2006
28. Manning C.P., Fruehan R.J.: Emerging Technology for Iron and Steelmaking, IOM 2001, v. 53, nr 10, 20 -23.
29. Resource Solution Metal Pas, 2006 Metaldoc 83.
30. Us Department of Energy: Energy Efficience and Renevable Energy: Industrial Technologies Program- Steel industry of the Future. 2003, Steelmaking Technology Developments. May 15, 2003.
31. Networking in European Steel Research. Publ. EUROFER, 2002.
32. Modelowanie procesów stalowniczych: in Steel Research International, 2006 nr1, 2005 nr 9, nr 10.
33. Zi-Kui Liu et al. JOM, 2003, December, 1-10
34. Future- Oriented Oxygen Steel Production, SMS Demag, 2006, 1–31.
35. Your Success with SAF Technology, SMS Demag, 2006, 1– 31.
36. Nupro Co: SLAG VISION BOF/QBOP/EAF Tapping,; LanceStat; TruStir; 2006 in www.nuprocorp.com;
37. AFFIVAL: Trimming with cored wire, 2006, 1–15.
38. FACTSAGE: Integrated Thermodynamic DataBank System 2006, in www.fatsage.com
39. Lund T., Olund P. : Development of Clean Steels- Advantages in Ladle Metallurgy and Testing Technology. Ovako Steel, Techn. R eport nr 1/2000.
40. Serano A.R., Pelton A.D.: ISIJ International 1999, v. 39, nr 5, 399–408.
41. An Investment in Steel Future, 2001–2003 Progess Report AISI 2004.
42. Sanyal S. Et al.:. ISIJ International 2004, v. 44, nr 7, 1157–1166.
43. Stolte G. :Secondary Metallurgy, Fundamentals, processes, applications. Bharat Book Bureau,New York 2002.
44. Dorcak L., Terpak J.: Metalurgija, 2006, v. 45, nr 2, 93–96.
45. Continuous Casting of Steel, CMPE, 2006, UBC Canada
46. AFAX: Foseco Steel, nr3, 2006
47. Davidson M.R, Lawson N.J. : Numerical Prediction of Submerged Oscillating Jet Flow. CSIRO, Melbourne December 6-8, 1999.
48. FLOW-3D(R) flow science 2006: Excellence in CFD Flow Modeling Software.
49. Cross M. et ali: The Multiphysics Modeling of Solidification and Melting Processes, JOM, 2002 TMS Pub.

Recenzent: dr inż. Lech Bulkowski