

Dorota Burchart-Korol\*

## ŚRODOWISKOWA OCENA TECHNOLOGII HUTNICTWA ŻELAZA I STALI NA PODSTAWIE LCA

### Streszczenie

Wzrastające wymagania dotyczące ochrony środowiska zmuszają przemysł stalowy do rozwijania ulepszonych technologii w celu ograniczania zużycia surowców i energii oraz zmniejszenia emisji zanieczyszczeń pyłowo-gazowych, szczególnie gazów cieplarnianych.

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki oceny cyklu życia (*Life Cycle Assessment*) dla procesu produkcji żelaza i stali w hucie o pełnym cyklu produkcyjnym (hucie zintegrowanej). Przeanalizowano wpływ technologii na środowisko oraz przedstawiono największe źródła emisji gazów cieplarnianych.

### Environment evaluation of iron and steel production technologies based on LCA

#### Abstract

Growing requirements concerning the environmental protection are forcing the iron and steel industry to develop applied technologies to limitation of raw materials and energy consumption and reduction of dust-gas pollutants emission, particularly greenhouse gasses.

In this paper results of LCA (*Life Cycle Assessment*) for iron and steel production technology in full production cycle mill (integrated plant) was shown. An influence of the technology on the environment was presented as well as the biggest sources of the greenhouse gas emission were described.

## WPROWADZENIE

Hutnictwo żelaza i stali jest sektorem charakteryzującym się dużym zużyciem energii i znaczną emisją zanieczyszczeń pyłowo-gazowych. W celu sprostania wysokim wymaganiom ekonomicznym i ekologicznym hutnictwo jest zmuszone do modernizowania procesów produkcyjnych. Szczególnie ważne jest poszukiwanie nowych metod ograniczenia emisji CO<sub>2</sub> dla wszystkich procesów w łańcuchach technologicznych; dotyczy to przede wszystkim hut o pełnym cyklu produkcyjnym.

W artykule przedstawiono wyniki oceny technologii wykorzystywanych w hutnictwie, na podstawie oceny cyklu życia, z wykorzystaniem metod: ekowskaźnika (*Ecoindicator 99*) i IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*), procesów produkcji stali w hucie zintegrowanej, do których należą: proces spiekania rud żelaza, proces wielkopiecowy, proces konwertorowy, ciągle odlewanie stali i walcowanie.

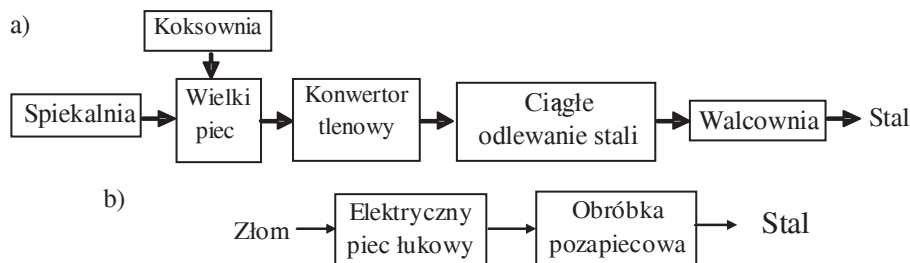
Analizę LCA przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN ISO 14040:2009. Składała się ona z czterech etapów: zdefiniowanie celu i zakresu LCA, analiza zbioru wejść i wyjść LCI (*Life Cycle Inventory*), ocena wpływu LCIA (*Life Cycle Impact Assessment*) oraz interpretacja (ISO 14040:2009).

---

\* Główny Instytut Górnictwa (dburchart@gig.eu)

## 1. TECHNOLOGIE PRODUKCJI STALI OBECNIE STOSOWANE W HUTNICTWIE KRAJOWYM

Obecnie w Polsce i na świecie dominują dwa sposoby wytwarzania stali. Pierwszy sposób jest stosowany w hutach zintegrowanych (o pełnym cyklu produkcyjnym). Surowka żelaza w takich hutach jest wytwarzana w wielkich piecach i przerabiana na stal w konwertorach tlenowych z dodatkiem złomu stalowego. Według drugiej metody stal jest wytwarzana ze złomu stalowego w procesie elektrycznym w stalowniach wyposażonych w piece łukowe (rys. 1).



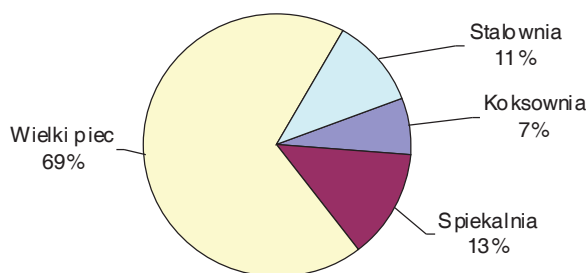
**Rys. 1.** Technologie obecnie stosowane w hutnictwie krajowym: a – w hucie zintegrowanej, b – w stalowni elektrycznej

**Fig. 1.** Current technologies used in national steel industry: a – integrated plant, b – electric arc furnace

W systemie produkcyjnym hut o pełnym cyklu produkcyjnym wyróżnia się: wytwarzanie i przetwarzanie surowca (spiekalnie rud i koksownie), produkcję tworzywa (wielkie piece i stalownie) oraz kształtowanie tworzywa (odlewanie stali, walcowanie, kucie, ciągnięcie oraz wyciskanie) (Burchart-Korol, Furman 2007).

Oddziaływanie na środowisko technologii stosowanych w produkcji stali ocenia się przede wszystkim pod względem emisji gazów cieplarnianych i zużycia energii. (Birat 2002, 2003; Hong Fu i in. 2010; Wang i in. 2008).

W Polsce stal w procesie konwertorowym jest wytapiana w dwóch hutach zintegrowanych. Pozostała część stali jest produkowana w stalowniach elektrycznych wyposażonych w elektryczne piece łukowe. Według Polskiego Przemysłu Stalowego (PPS 2010) w 2009 roku w Polsce wyprodukowano 7,1 mln Mg stali surowej. Udział stali wytapianej w procesie konwertorowym wyniósł 45,4% (3,2 mln Mg), a stali wytapianej w procesie elektrycznym 54,6% (3,9 mln Mg). Hutnictwo w Polsce emituje około 4,5% krajowej ogólnej emisji CO<sub>2</sub>. W strukturze zanieczyszczeń gazowych, emitowanych w przemyśle stalowym, największy udział stanowi emisja CO<sub>2</sub> (98,1%) (rys. 2). Emisje pozostałych gazów: NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, CO stanowią około 1,9%.



Rys. 2. Udział procesów w emisji CO<sub>2</sub> (PPS 2010)

Fig. 2. Share of processes in CO<sub>2</sub> emission (PPS 2010)

## 2. ROLA LCA W ŚRODOWISKOWEJ OCENIE PRODUKCJI STALI

Ocena cyklu życia (*Life Cycle Assessment*) jest nową techniką wykorzystywaną w zarządzaniu środowiskowym. Jednym z głównych założeń techniki LCA jest dążenie do wykazania wszystkich czynników, mających potencjalny wpływ na środowisko i związanych z danym produktem lub technologią.

Obecnie stosowane technologie produkcji żelaza i stali, mimo wielu nowoczesnych inwestycji nadal charakteryzują się negatywnym wpływem na środowisko, co dotyczy szczególnie emisji CO<sub>2</sub> i zużycia energii. Dlatego są poszukiwane nowe rozwiązania, do których należą innowacyjne technologie przyszłościowe opracowywane w ramach programów międzynarodowych dotyczących ograniczania emisji CO<sub>2</sub>.

W sektorze metalurgicznym są prowadzone analizy LCA w ramach działalności Międzynarodowego Instytutu Żelaza i Stali (ISII – The International Iron and Steel Institute – obecnie zmienił nazwę na Worldsteel). W 2003 roku zapoczątkowano inicjatywę „CO<sub>2</sub> Breakthrough Programme” w celu wymiany informacji dotyczących badań nad ograniczeniem emisji CO<sub>2</sub> sektora stalowego na świecie. Europejski program naukowo-badawczy ULCOS (*Ultra-low CO<sub>2</sub> Steelmaking* – niskoemisyjna produkcja stali), jest natomiast nową inicjatywą europejskiego przemysłu stalowego w dziedzinie energii i zmian klimatycznych. Celem programu jest ograniczanie negatywnego oddziaływania przemysłu stalowego na środowisko przez poszukiwanie innowacyjnych rozwiązań i nowych technologii oraz redukcja o połowę CO<sub>2</sub> emitowanego w procesach hutnictwa żelaza i stali.

W programie ULCOS jako najbardziej kompleksową metodę oceny wpływu środowiskowego, w tym również wpływu technologii na emisję gazów cieplarnianych i doboru technologii, uznano ocenę cyklu życia – LCA dlatego, że umożliwia ocenę aspektów środowiskowych i potencjalnych wpływów związanych ze wszystkimi etapami życia produktów oraz procesów obejmujących: wydobywanie i przetwarzanie surowców mineralnych, proces produkcyjny, dystrybucję, transport, użytkowanie, recykling oraz ostateczne unieszkodliwianie odpadów (Burchart-Korol 2010a). Technika LCA jest wykorzystywana w różnych branżach, może także służyć dla porównania wpływu środowiskowego stali, aluminium oraz innych materiałów inżynierskich. Organizacja WorldAutoSteel wykonuje LCA w celu oceny różnych rodzajów stali,

szczególnie AHSS (*Advanced High-Strength Steels*). Analiza LCA jest wykonywana już na etapie projektowania w celu stworzenia produktów o jak najmniejszym wpływie na środowisko w całym ich cyklu życia (Burchart-Korol 2010b).

Iosif i in. (Iosif, Hanrot, Ablitzer 2008; Iosif i in. 2010) przeprowadzili analizę LCA dla procesów produkcji stali. Stwierdzono, że LCA umożliwia modelowanie obecnych, alternatywnych i przyszłościowych technologii hutniczych, a także analizę i ocenę wpływu produkcji żelaza i stali na emisje gazów cieplarnianych na podstawie całkowitej emisji w cyklu życia stali.

### 3. METODA BADAŃ

Przeprowadzono środowiskową ocenę głównych procesów produkcji żelaza i stali w hucie o pełnym cyklu produkcyjnym z wykorzystaniem techniki LCA.

Na podstawie danych zawartych w raportach Najlepszych Dostępnych Technik BAT (*Best Available Technique*) oraz przeanalizowaniu technologii metalurgicznych przeprowadzono szacunkową ocenę cyklu życia (tzw. *screening LCA*). Na podstawie przeglądu technologii hutniczych i wyników *screening LCA*, do analizy szczegółowej wybrano podstawowe procesy produkcji stali w hucie zintegrowanej o pełnym cyklu produkcyjnym (obejmującym spiekalnię, wielkie piece, stalownię konwertorową, ciągle odlewania i walcownie).

Zgodnie z normą PN-EN ISO 14040:2009 wyznaczono cel, zakres, granice systemu oraz ograniczenia analizy LCA oraz przeanalizowano zbiory wejść i wyjść LCI (*Life Cycle Inventory*).

Pełna analiza cyklu życia technologii jest procesem złożonym, dlatego w badaniach wprowadzono pewne ograniczenia. Analiza oddziaływania na środowisko, z wykorzystaniem techniki LCA, dla technologii stosowanych w hutnictwie żelaza i stali została przeprowadzona tylko dla etapu użytkowania. W celu oceny zagrożeń ekologicznych, powodowanych przez poszczególne procesy ciągu technologicznego, przeanalizowano materiały wsadowe do procesu, przy czym ograniczono się do materiałów pozyskiwanych tylko z zewnątrz (spoza huty). W celu przeprowadzenia LCA zgodnie z normą określono granice systemu (rys. 3)<sup>1</sup>. Nie uwzględniono w analizie LCA następujących danych wejściowych:

- produkty pośrednie: spiek, surówka, stal płynna,
- produkty uboczne zagospodarowywane w procesach huty,
- gazy: wielkopiecowy i konwertorowy.

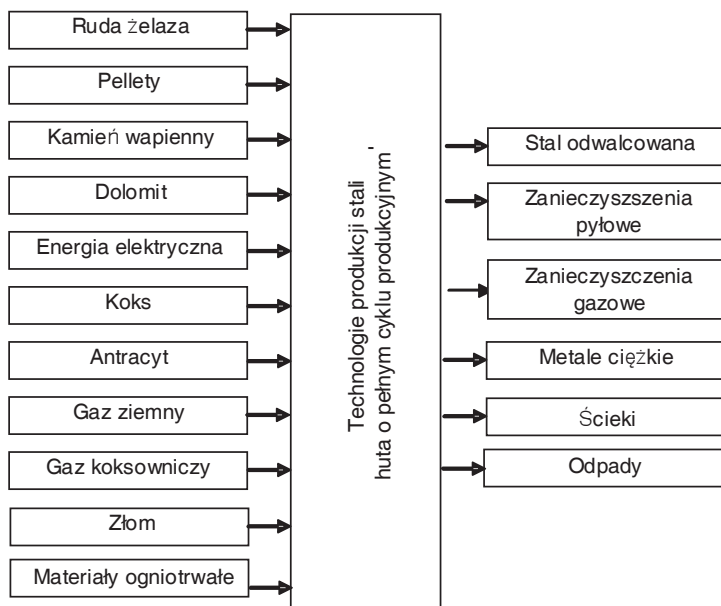
Należy również zaznaczyć, że przeprowadzono LCA dla technologii w krajowej hucie, która składa się z czterech głównych wydziałów produkcyjnych: spiekalni, wielkich pieców, konwertorów i walcowni. W skład huty nie wchodzi koksownia.

W celu uzyskania danych, opracowano arkusz danych dla procesów jednostkowych<sup>2</sup>, zawierający dane wejściowe (zużycie surowców i energii) oraz dane wyjściowe

<sup>1</sup> Zestaw kryteriów określających, które procesy jednostkowe są częścią systemu wyrobu (system boundary).

<sup>2</sup> Najmniejszy element rozważany w analizie zbioru wejść i wyjść cyklu życia, dla którego są kwantyfikowane dane wejściowe i wyjściowe.

we (produkty, emisje zanieczyszczeń pyłowo-gazowych, ścieki i odpady). Zebrano dane przemysłowe do arkuszy dla wybranych procesów jednostkowych potrzebnych do wykonania bilansu oraz oceny cyklu życia (LCA). W celach porównawczych wszystkie dane zostały określone w odniesieniu do tej samej jednostki funkcjonalnej<sup>3</sup>, czyli do 1 Mg ciekłej stali. Przeprowadzono także analizy poszczególnych technologii produkcji stali w łańcuchu technologicznym.



Rys. 3. Dane wejściowe i wyjściowe produkcji żelaza i stali w hucie zintegrowanej w granicach systemu

Fig. 3. Input and output data of iron and steel production in integrated plant in system boundary

Końcowy wynik analizy oddziaływania na środowisko technologii został wyrażony za pomocą ekowskaźnika (Ecoindicator 99). Ekowskaźnik ten jest miarą wpływu technologii na środowisko naturalne. Im większa wartość ekowskaźnika tym większy potencjalny negatywny wpływ na środowisko. Do przedstawienia wpływu technologii na gazy cieplarniane (jako ekwiwalent CO<sub>2</sub>) zastosowano metodę IPCC GWP 100a (*Intergovernmental Panel on Climate Change, Global Warming Potential, 100 years*).

#### 4. DYSKUSJA WYNIKÓW

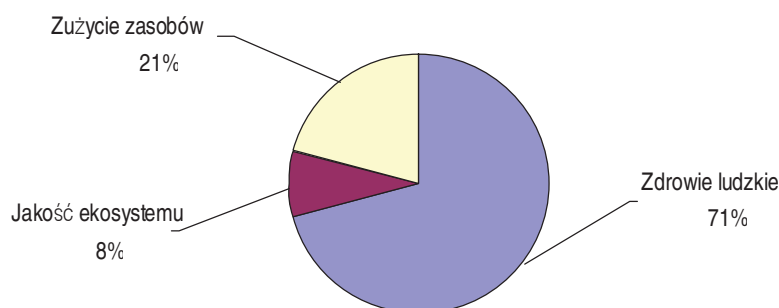
Analizę LCA technologii produkcji żelaza i stali wykonano w Głównym Instytucie Górnictwa z zastosowaniem programu SimaPro 7.1.8 wraz z bazą danych. Do analizy wykorzystano metodę ekowskaźnika dla całej huty, a także dla poszczególnych procesów produkcji żelaza i stali. Oddziaływanie technologii z uwzględnieniem 11 kategorii wpływów przedstawiono w tabeli 1.

<sup>3</sup> Ilościowy efekt systemu wyrobu, stosowany jako jednostka odniesienia.

Ocenę zagrożeń środowiskowych powodowanych przez stosowanie technologii produkcji żelaza i stali w trzech kategoriach oddziaływań: „zdrowie ludzkie”, „jakość ekosystemu” oraz „zużycie zasobów” zilustrowano rysunkiem 4.

**Tablica 1.** Ocena oddziaływania na środowisko technologii hutnictwa żelaza i stali w jedenastu kategoriach wpływów

Kategorie wpływu	Udział, %
Czynniki kancerogenne	14,016
Układ oddechowy – związki organiczne	0,046
Układ oddechowy – związki nieorganiczne	41,880
Zmiana klimatu	14,915
Promieniowanie	0,036
Niszczenie warstwy ozonowej	0,001
Ekotoksyczność	4,246
Zakwaszenie/eutrofizacja	2,107
Wykorzystanie terenu	1,508
Wykorzystanie minerałów	0,379
Wykorzystanie paliw kopalnych	20,866



**Rys. 4.** Trzy główne kategorie oddziaływań produkcji żelaza i stali

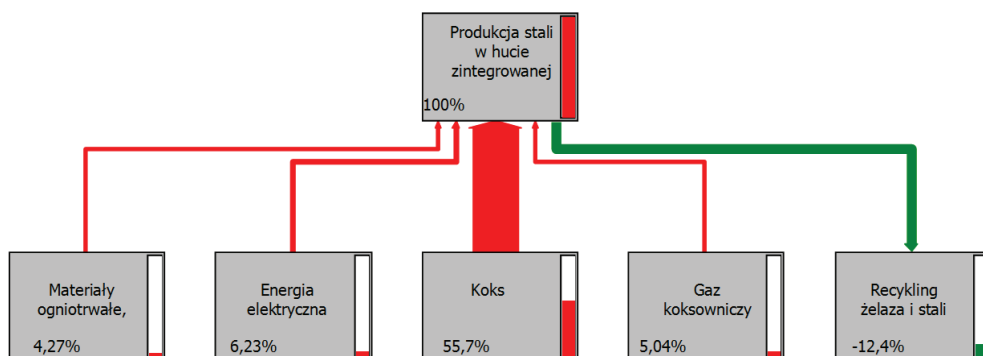
**Fig. 4.** Tree impact categories of iron and steel production

Z rysunku 4 wynika, że największe obciążenie środowiska występuje w kategorii „zdrowie ludzkie”. Kategoria ta stanowi 71% wszystkich kategorii wpływów, natomiast zużycie zasobów 21%. Największy wpływ na zdrowie ludzkie ma proces spiekania rud żelaza oraz proces wielkopiecowy. W kategorii „zdrowie ludzkie” obciążenie związane z problemami oddechowymi, wynikającymi z zanieczyszczeń nieorganicznych, stanowi 41,88% wszystkich kategorii wpływu. Przedstawione wyniki stanowią potwierdzenie wcześniejszych badań Burchart (2004), zgodnie z którymi proces spiekania rud żelaza jest największym źródłem emisji w hutnictwie żelaza i stali, szczególnie  $SO_x$ ,  $NO_x$ , metali ciężkich, a także dioksyn i furanów.

W celu określenia wpływu poszczególnych technologii na emisje gazów cieplarnianych do oceny cyklu życia zastosowano również metodę IPCC. Określono ekwiwalent  $CO_2$ , który dla technologii produkcji żelaza i stali (w hucie o pełnym cyklu produkcyjnym) wynosi 4480 kg  $CO_2$ -Eq na 1 Mg stali.

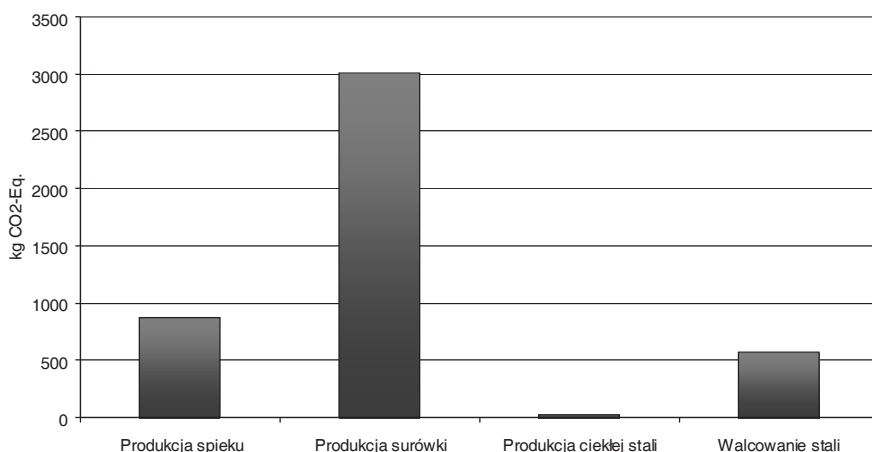
Pięć podstawowych elementów wejściowych technologii produkcji żelaza i stali, które mają największy wpływ na emisje gazów cieplarnianych (zgodnie z metodą IPCC), przedstawiono na rysunku 5. Stanowią one 58,84% wszystkich materiałów

wykorzystywanych do produkcji żelaza i stali. Stwierdzono, że największy wpływ ma koks, który jest wykorzystywany przede wszystkim w procesie produkcji surówki w wielkim piecu, co przedstawiono na rysunku 6, na którym porównano wpływ podstawowych procesów produkcji żelaza i stali na emisję gazów cieplarnianych.



Rys. 5. Wpływ podstawowych czynników wejściowych na emisję gazów cieplarnianych

Fig. 5. Influence of main input factors on greenhouse gas emissions



Rys. 6. Wpływ podstawowych procesów hutnictwa żelaza i stali na emisję gazów cieplarnianych

Fig. 6. Influence of main iron and steel production processes on greenhouse gas emissions

W krajowym hutnictwie żelaza około 60% dostarczonej energii jest zużywana w wydziałach surowcowych (koksowniach, spiekalniach i wielkich piecach), przy czym ponad połowa tego zużycia przypada na wielkie piece, które stanowią największe źródło emisji CO<sub>2</sub>. Dlatego metody ograniczania emisji CO<sub>2</sub> powinny dotyczyć przede wszystkim technologii wielkopiecowych.

Obecnie na świecie są dostępne technologie, które mogą zastąpić procesy wielkopiecowej produkcji surówki żelaza. Wielkie piece wymagają koksu, a koksownie są kosztowne i stwarzają wiele problemów środowiskowych, związanych z ich eksploatacją. Biorąc pod uwagę czynniki ekonomiczne i środowiskowe korzystna byłaby



produkcja surówki żelaza bez stosowania koksu. Coraz więcej stali jest produkowanej ze złomu w elektrycznych piecach łukowych EAF (*Electric Arc Furnace*). Produkcja stali ze złomu wymaga znacznie mniej energii w porównaniu z produkcją stali z rudy żelaza. Jednak otrzymywanie odpowiedniej jakości stali produkowanej na bazie złomu stanowi pewien problem.

Produkcja ciekłego żelaza na świecie była i nadal jest zdominowana przez technologie wielkopiecowego wytapiania żelaza. Produkcja ta wynosi obecnie około 95% całkowitej produkcji żelaza z rud na świecie. Stopniowo są rozszerzane alternatywne technologie produkcji stali, do których należą redukcja bezpośrednia rud DRI (*Direct Reduction Iron*) oraz procesy redukcyjnego wytapiania żelaza SR (*Smelting Reduction*) (Lis 2000; BAT 2009).

## PODSUMOWANIE

W artykule omówiono wpływ technologii hutnictwa żelaza i stali na środowisko. Analizy i obliczenia zostały przeprowadzone w programie SimaPro 7.1.8 z wykorzystaniem metody ekowskaźnika 99 oraz IPCC.

Na podstawie oceny cyklu życia oszacowano efekty ekologiczne związane z badanymi technologiami produkcji żelaza i stali, określono także ich wpływ na emisje gazów cieplarnianych. Stwierdzono, że największym źródłem emisji zanieczyszczeń pyłowo-gazowych jest proces spiekania rud żelaza, natomiast największym źródłem emisji gazów cieplarnianych jest proces wielkopiecowy, ze względu na duże zużycie koksu (średnio 430 kg na 1 Mg stali). Dlatego metody ograniczania emisji zanieczyszczeń powinny być skierowane na produkcję surówki żelaza. Można wyróżnić dwa sposoby ograniczania emisji:

- 1) zastąpienie koksu innymi paliwami, a szczególnie zwiększenie udziału paliw odnawialnych,
- 2) zastosowanie technologii alternatywnych do procesów wielkopiecowych.

Artykuł został opracowany w ramach projektu pt. „Opracowanie modelu oceny efektywności technologii zrównoważonego rozwoju”, współfinansowanego przez Unię Europejską z Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka.

## Literatura

1. BAT (2009): Reference Document on Best Available Techniques for the Production on Iron and Steel. Draft, European Commission.
2. Birat J.P. (2002): The Challenge of Global Warming to the Steel Industry – a European Viewpoint. POSCO Conference, Pohang, Korea.
3. Birat J.P. (2003): Greenhouse Gas Emissions of the Steel Industry – Avenues Open for a Responsible and Sustainable Management of Emissions. La Revue de Métallurgie-CIT.
4. Burchart D. (2004): Ocena emisji zanieczyszczeń pyłowo-gazowych z procesu spiekania rud żelaza. Katowice, Politechnika Śląska (praca doktorska).
5. Burchart-Korol D. (2010a): Life Cycle Assessment – the New Environmental Management Tool in Steel Plants. Hutnik – Wiadomości Hutnicze nr 3.



6. Burchart-Korol D. (2010b): Significance of Environmental LCA Method in the Iron and Steel Industry. *Metalurgija* (w druku).
7. Burchart-Korol D., Furman J. (2007): Zarządzanie produkcją i usługami. Podręcznik akademicki. Gliwice, Politechnika Śląska.
8. Hong Fu L., Wei Jun B., Hui Quan L., Da Qiang C. (2010): Energy Recovery and Abatement Potential of CO<sub>2</sub> Emissions for an Integrated Iron and Steelmaking Enterprise. *Science China – Technological Sciences* 1.
9. Iosif A.M., Hanrot F., Ablitzer D. (2008): Process Integrated Modelling for Steelmaking – Life Cycle Inventory Analysis. *Environmental Impact Assessment Review* 28.
10. Iosif A.M., Hanrot F., Birat J.P., Ablitzer D. (2010): Physicochemical Modelling of the Classical Steelmaking Route for Life Cycle Inventory Analysis. *International Journal of Life Cycle Assessment* 15.
11. Lis T. (2000): Współczesne metody otrzymywania stali. Gliwice, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej.
12. PN-EN ISO 14040:2009 Zarządzanie środowiskowe. Ocena cyklu życia. Zasady i struktura.
13. PPS (2010) Polski Przemysł Stalowy – Raport, Hutnicza Izba Przemysłowo-Handlowa.
14. Wang C., Larsson M., Ryman C., Grip C.E., Wikström J.O., Johnsson A., Engdahl J. (2008): A Model on CO<sub>2</sub> Emission Reduction in Integrated Steelmaking by Optimization Methods. *International Journal of Energy Research* 12.

**Recenzent:** prof. dr hab. inż. Krzysztof Stańczyk