

Janusz STECKO
Marian NIESLER
Piotr RÓŻAŃSKI

Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Metalurgii Żelaza ■ Łukasiewicz Research Network – Institute of Ferrous Metallurgy

CHARAKTERYSTYKA RUD ŻELAZA I KONCENTRATÓW Z ZASTOSOWANIEM LABORATORYJNYCH PRÓB SPIEKANIA NA PÓLPRZEMYSŁOWEJ MISIE SPIEKALNICZEJ

CHARACTERISATION OF IRON ORES AND CONCENTRATES WITH THE USE OF LABORATORY SINTERING TESTS ON A SEMI-INDUSTRIAL SINTERING PAN

W artykule przedstawiono charakterystykę rud żelaza i koncentratów pod kątem oceny ich wpływu na proces spiekania oraz na właściwości fizykochemiczne spieku. Opisano metodykę prowadzenia laboratoryjnych prób spiekania na misie z wykorzystaniem istniejącej w Zespole Procesów Surowcowych Łukasiewicz – Instytutu Metalurgii Żelaza linii do półprzemysłowej symulacji procesu spiekania rud żelaza i odpadów jak i innych urzędzeń pomocniczych. Zamieszczono również wyniki dotyczące wpływu udziału różnych składników pylastych (koncentratów), drobnoziarnistych rud żelaza (aglorud) i dodatku wapna palonego do mieszanki na podstawowe parametry procesu spiekania. Zaprezentowano również wyniki badań właściwości wyprodukowanego spieku z różnych mieszanek spiekalniczych.

Słowa kluczowe: spiekanie rud żelaza, udział koncentratów, wydajność produkcyjna, zużycie paliwa

1. WPROWADZENIE

W Zakładzie Badań Procesów Surowcowych Instytutu od dłuższego czasu realizowany jest program badań nad doborem składu mieszanek rud żelaza do procesu spiekania. Program ten zawiera ocenę przydatności technologicznej poszczególnych rud żelaza w zależności od ich rodzaju i udziału w mieszance mineralnej. Obejmował on laboratoryjne próby spiekania z różnym udziałem składników pylastych tj. koncentratów magnetytowych, przy zachowaniu stałej zasadowości oraz w wyniku zmiany dodatku wapna palonego do surowej mieszanki spiekalniczej. Wykonano również badania zamiany poszczególnych komponentów mineralnych innymi rodzajami rud i koncentratów.

Celem badań było określenie wpływu zmian składu mieszanki na podstawowe parametry procesu spiekania i właściwości otrzymywanego z prób spiekania spieku wielkopiecowego, definiując wcześniej tzw. mieszankę referencyjną. Wyniki z tych badań są podstawą do określenia optymalnych składów mieszanek spiekalniczych w celu zwiększenia

The article presents the characteristics of iron ores and concentrates in terms of assessing their impact on the sintering process and on the physicochemical properties of the sinter. The article describes the methodology for conducting laboratory sintering tests on a pan using the line for semi-industrial simulation of sintering of iron ore and waste as well as other auxiliary devices at the Primary Processes Unit of the Łukasiewicz – Institute of Ferrous Metallurgy. The results of the influence of various dusty components (concentrates), fine-grained iron ores (sinter ores) and addition of quicklime to the mixture on the basic parameters of the sintering process are also included. The results of tests on the properties of sinters made from various sintering mixtures are also presented.

Keywords: sintering of iron ores, content of concentrates, productivity, fuel consumption

1. INTRODUCTION

The Department of Primary Processes of the Institute has been implementing a research programme on the selection of composition of iron ore mixtures for the sintering process for a long time. This programme provides an assessment of the technological suitability of individual iron ores, depending on their type and content in the mineral mixture. It included laboratory sintering tests with various proportions of dusty components, i.e. magnetite concentrates, maintaining constant alkalinity and as a result of changing the addition of quicklime to the raw sinter mixture. Studies on the replacement of individual mineral components with other types of ores and concentrates were also carried out.

The aim of the study was to determine the impact of changes in the composition of the mixture on the basic parameters of the sintering process and properties obtained from sintering tests of a blast furnace sinter, previously defining the reference mixture. The results of these tests are the basis for determining the optimal composition of sinter

wydajności, poprawy właściwości fizykochemicznych spieku oraz obniżenia kosztów wytwarzania spieku.

Wszystkie próby spiekania były wykonywane na laboratoryjnej linii do półprzemysłowej symulacji procesu spiekania rud żelaza, której schemat przedstawiono na rys. 1.

Linia spiekania wyposażona jest w filtr ceramiczny do oczyszczania spalin. Dodatkowo, filtr wyposażony jest w układ dozowania różnego rodzaju sorbentów (np. wapna), których zadaniem jest zwiększenie skuteczności neutralizacji szkodliwych substancji. Podczas prób spiekania prowadzi się ciągły pomiar składu spalin, oznaczając zawartość O_2 , CO , CO_2 , NO_x , CH_4 oraz SO_2 przed filtrem, jak i w kominie. W zależności od programu badań, istnieje możliwość pobierania próbek gazów odlotowych zarówno przed filtrem, jak i w kominie, równocześnie oznaczając w tych gazach stężenie pyłu.

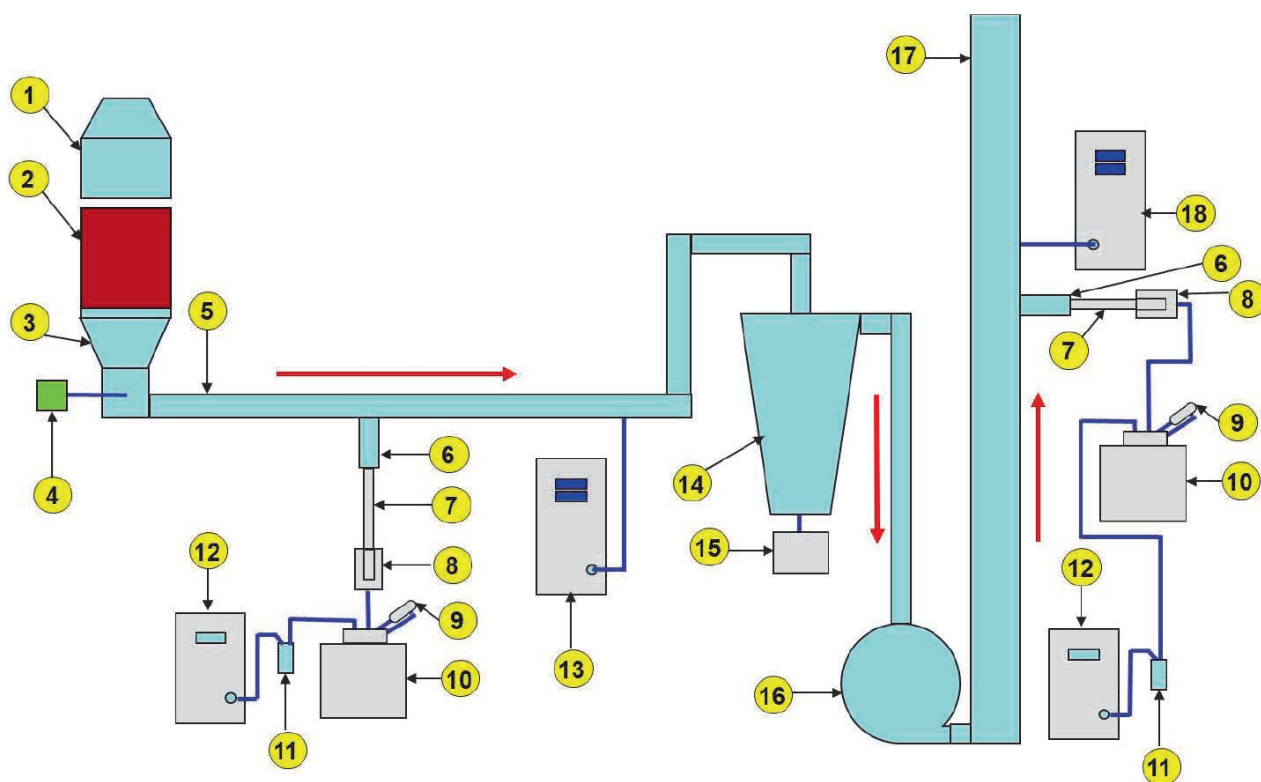
W niniejszym artykule zaprezentowano wyniki pewnego fragmentu badań wykonywanych na linii do półprzemysłowej symulacji procesu spiekania rud żelaza w Zakładzie Badań Procesów Surowcowych. Instalacja ta wykorzystywana jest także przy realizacji badań z wykorzystaniem żelazonośnych odpadów [1] i produktów ubocznych [2, 3] oraz alternatywnych wobec koksiku paliw stałych [4–7].

mixtures in order to increase efficiency, improve the physicochemical properties of the sinter and reduce the costs of sinter production.

All sintering tests were performed on a laboratory line for semi-industrial simulation of the sintering process of iron ore, the diagram of which is shown in Fig. 1.

The sintering line is equipped with a ceramic filter for flue gas scrubbing. In addition, the filter is equipped with a dosing system for various types of sorbents (e.g. lime), the task of which is to increase the effectiveness of neutralisation of harmful substances. During sintering tests, a continuous measurement of the flue gas composition is carried out, determining the content of O_2 , CO , CO_2 , NO_x , CH_4 and SO_2 before the filter and in the chimney. Depending on the testing programme, it is possible to collect waste gas samples both upstream of the filter and in the chimney, while simultaneously collecting dust from the pipeline gravimetrically.

This article presents the results of a section of research carried out on the line for the semi-industrial simulation of iron ore sintering process at the Department of Primary Processes. This installation is also used to carry out tests using iron-bearing waste [1] and by-products [2, 3] as well as solid fuels alternative to fly ash [4–7].



1. Palnik ■ Burner
2. Misa spiekalnicza ■ Sintering pan
3. Pomiar temperatury ■ Temperature measurement
4. Pobór pyłów przed wlotem do filtra ceramicznego ■ Collection of dusts before the ceramic filter inlet
5. Rurociąg spalin ■ Flue gas pipeline
6. Punkt poboru (króciec) ■ Collection point (connector)
7. Sonda z płaszczem termostatycznym ■ Probe with a thermostatic cloak
8. Filtr celulozowy (gilza) ■ Celluloid filter (casing)
9. Absorber związków organicznych z fazy gazowej ■ Absorber of organic compounds from gas phase

10. Chłodnica z butelką na kondensat ■ Cooler with a condensate collecting bottle
11. Pochłaniacz wilgoci ■ Moisture absorber
12. Pompa ssąca z układem sterowania ■ Suction pump with a control system
13. Analizator – ciągła analiza gazów po stronie brudnej ■ Analyser – continuous analysis on the “dirty” side
14. Filtr ceramiczny ■ Ceramic filter
15. Pobór pyłów ze zbiornika filtra ceramicznego ■ Collection of fluids from the ceramic filter tank
16. Wentylator odciągowy ■ Exhaust fan
17. Komin ■ Chimney
18. Analizator – ciągła analiza gazów po stronie czystej ■ Analyser – continuous analysis on the “clean” side

Rys. 1. Schemat linii do półprzemysłowej symulacji procesu spiekania rud żelaza

Fig. 1. Diagram of the line for semi-industrial simulation of the sintering process of iron ore

2. METODYKA PROWADZENIE PRÓB SPIEKANIA

Próby spiekania polegają na przeprowadzeniu serii eksperymentów procesu spiekania, a następnie wykonaniu badań właściwości fizykochemicznych wyprodukowanego spieku (wytrzymałości, ścieralności, redukcyjności RI, wskaźnika RDI, zakres mięknięcia, analiz chemicznych i fazowych).

2.1. WSTĘPNE PRZYGOTOWANIE POSZCZEGÓLNYCH KOMPONENTÓW DO PROCESU SPIEKANIA (UŚREDNIANIE)

Komponenty do prób spiekania zwykle dostarczane są do Instytutu w workach typu big-bag (około 1 tony), a następnie są poddawane uśrednianiu. W przypadku komponentu, który był dostarczony w ilości większej niż jedna tona, przed uśrednieniem wszystkie big-bagi były wcześniej mieszane razem.

Uśrednianie komponentów (pod względem składu chemicznego oraz zawartości wody niezwiązanej) do prób spiekania w misie realizuje się w wyniku mieszania mechanicznego (za pomocą wózka widłowego wyposażonego w łyżkę), z następnym rozdzielaniem, przy użyciu urządzenia obrotowego (Rys. 2). Ujednorodnione i rozdzielone na mniejsze porcje próbki materiału składowane są w hermetycznych pojemnikach (Rys. 3).

Identyfikowalność partii każdego surowca (złożonego z jednego lub kilku big-bagów) jest zabezpieczona przez podstawowe informacje (nazwa, data dostarczenia, wilgotność) oraz poprzez analizę chemiczną. Szczelnie zamknięte pojemniki składowane są na paletach w budynku magazynowym, zapewniając stosowanie komponentów o stałym składzie chemicznym i ze stałym udziałem wody niezwiązanej. Wilgotność surowca zwykle jest jeszcze sprawdzana poprzez oznaczenie bezpośrednio przed wykorzystaniem do prób spiekania, ponieważ może się różnić w zależności od czasu przechowywania i lokalizacji składowania (Rys. 3).



Rys. 2. Urządzenie do uśredniania materiałów [8]
Fig. 2. Material averaging device [8]

2. METHODOLOGY OF SINTERING TESTS

Sintering tests consist of conducting a series of sintering experiments, and then testing the physical and chemical properties of the sintered material (strength, abrasion, RI reducibility, RDI, softening range, chemical and phase analyses).

2.1. INITIAL PREPARATION OF INDIVIDUAL COMPONENTS FOR THE SINTERING PROCESS (AVERAGING)

Sintering test components are usually delivered to the Institute in big-bags (about 1 ton), and then averaged. For a component that was delivered in a quantity exceeding one ton, all big-bags were mixed together before averaging.

The averaging of the components (in terms of chemical composition and free water content) for sintering tests in a pan is carried out as a result of mechanical mixing (using a forklift equipped with a scoop), with subsequent separation using a rotary device (Fig. 2). The material samples, homogenised and separated into smaller portions, are stored in hermetic containers (Fig. 3).

The batch traceability for each raw material (consisting of one or several big-bags) is secured by basic information (name, date of delivery, humidity) and by chemical analysis. Tightly closed containers are stored on pallets in a storage building, ensuring the use of components with a constant chemical composition and a constant content of free water. The moisture content of the raw material is usually also checked by marking immediately before use for sintering tests, as it may vary depending on storage time and storage location (Fig. 3).



Rys. 3. Hermetycznie zamknięte pojemniki z materiałami wsadowymi
Fig. 3. Hermetically sealed containers with feedstock

2.2. PRZYGOTOWANIE MIESZANKI SPIEKALNICZEJ

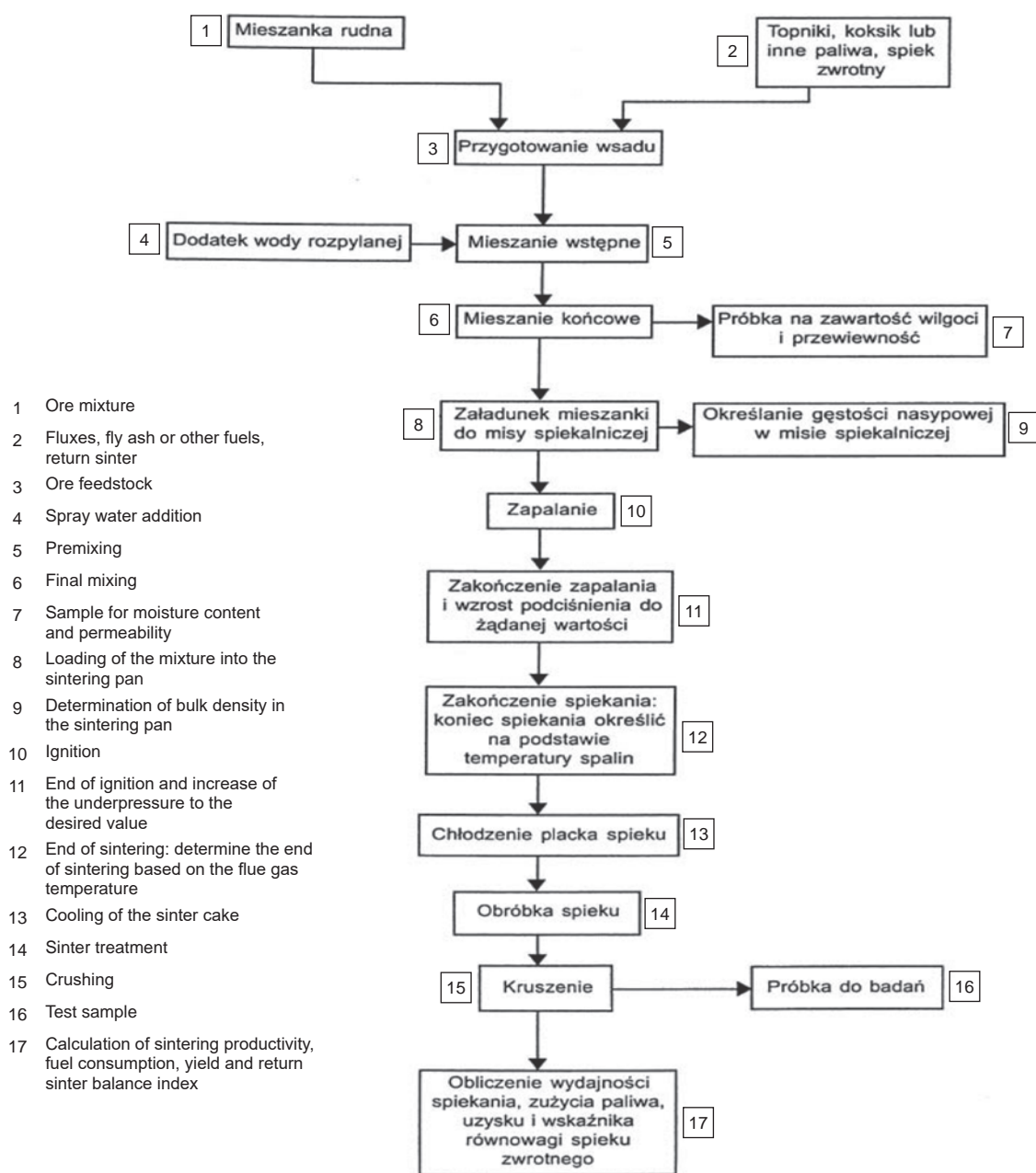
Kolejnym bardzo istotnym etapem jest przygotowanie mieszanki spiekalniczej o wymaganym składzie, wyrażonym udziałem rud i innych nośników żelaza, topników i paliwa stałego o określonej zawartości wody, wysokiej jednorodności i granulacji. Sposób prowadzenia laboratoryjnych prób spiekania na misie spiekalniczej w zakresie pojedynczego testu prowadzi się wg normy [9] i według schematu zaprezentowanego na rys. 4.

Po przygotowaniu wszystkich komponentów wg uzgodnionego składu (receptury), mieszankę spiekalniczą sporządza się odważając poszczególne składniki, które następnie, przy użyciu specjalnego zasobnika załadownego (Rys. 5a), zasypywane są do mieszarki turbinowej (Rys. 5b). Urządzenie to dysponuje regulacją obrotów miski i mieszadła. Przeznaczone jest do mieszania i grudkowania do 200 kg materiałów drobnoziarnistych, tj. pyłów, mułów, żużli, rud, itp.

2.2. PREPARATION OF THE SINTERING MIXTURE

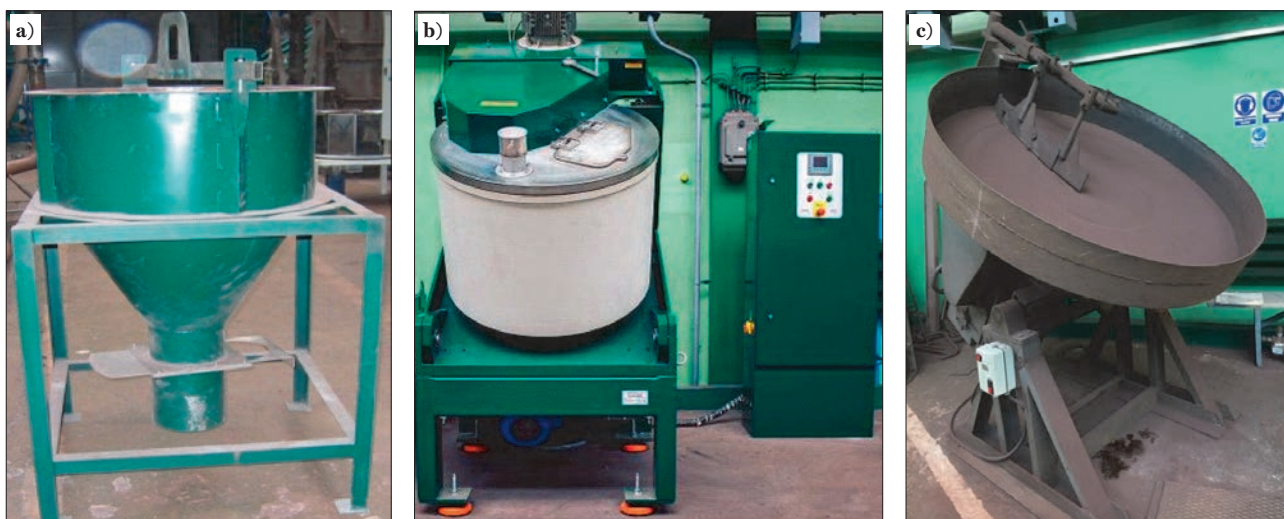
The next very important stage is the preparation of the sintering mixture with the required composition, expressed in the content of ores and other iron carriers, fluxes and solid fuel with the required water content, high homogeneity and granulation. The method of conducting laboratory sintering tests on a sinter pan within the scope of a single test is carried out according to standard [9] and according to the diagram presented in Fig. 4.

Once all components are prepared according to of the agreed composition (recipe), the sintering mixture is prepared by weighing individual components, which are then poured into a turbine mixer (Fig. 5b) using a special loading hopper (Fig. 5a). This device allows pan and agitator control. It is intended for mixing and pelleting up to 200 kg of fine-grained materials, i.e. dusts, sludges, slags, ores, etc. in a wide grain range. Alternatively, a pelletiser can be used for pelleting the sintering mixture (Fig. 5c).



Rys. 4. Schemat technologiczny prowadzenia prób spiekania [9]

Fig. 4. Sintering test flow sheet [9]



Rys. 5. Urządzenia stosowane do przygotowania mieszanki spiekalniczej: a) zasobnik załadowczy, b) mieszarka turbinowa, c) grudkownik talerzowy

Fig. 5. Device used for the preparation of the sintering mixture: a) loading container, b) turbine mixer, c) pelletiser

w szerokim zakresie ziarnowym. Do grudkowania mieszanki spiekalniczej alternatywnie może być wykorzystany talerz grudkujący (Rys. 5c).

2.3. ŁADOWANIE SUROWEJ MIESZANKI DO MISY SPIEKALNICZEJ PRZED ROZPOCZĘCIEM SPIEKANIA

Etap ładowania mieszanki jest realizowany ręcznie i aby uniknąć różnic w przewodności mieszanki, do ładowania używane jest znormalizowane narzędzie [8] (Rys. 6). W zależności od rodzaju surowej mieszanki, całkowite załadowanie misy to około 190 kg mieszanki.

2.3. LOADING OF THE RAW MIXTURE INTO THE SINTERING PAN BEFORE SINTERING

The stage of loading the mixture is carried out manually, and to avoid differences in the aeration of the mixture, a standardised tool is used for loading [8] (Fig. 6). Depending on the type of raw mixture, a full pan load is around 190 kg of mixture.



Rys. 6. Misa spiekalnicza z narzędziem do ręcznego ładowania mieszanki

Fig. 6. Sintering pan with a device for manual mixture loading

Jeszcze przed załadowaniem surowej mieszanki do misy, na ruszt wyklada się warstwę spieku o ziarnistości 15÷25 mm i wysokości ok. 40 mm czyli tzw. podsypkę. Ta warstwa spieku służy do ochrony rusztu.

Before loading the raw mixture into the pan, a sinter layer with a grain size of 15–25 mm and a height of approx. 40 mm, i.e. ballast, is laid on a grate. This sinter layer protects the grate.

2.4. ZAPŁON I SPIEKANIE MIESZANKI WRAZ Z ANALIZĄ SKŁADU SPALIN I POMIAREM TEMPERATURY

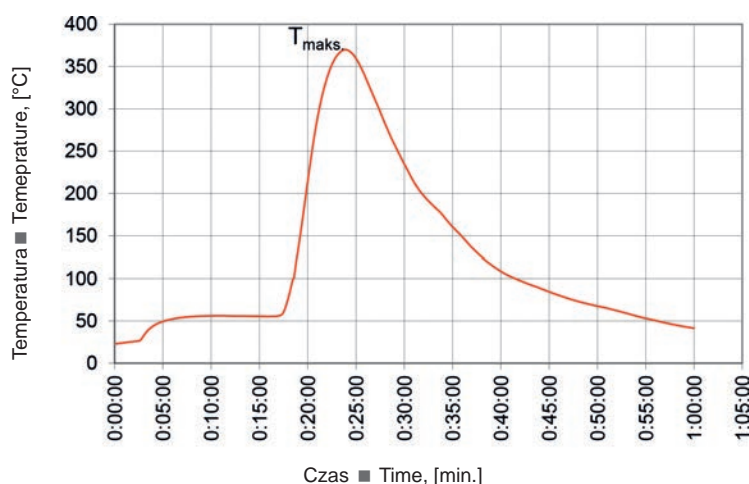
Próby spiekania mieszanki prowadzone są najczęściej przy wysokości warstwy wynoszącej 550 mm (na posiadanym urządzeniu istnieje możliwość prowadzenia prób z innymi wysokościami spiekanej warstwy poprzez zmianę misy na niższą – 300 mm oraz 450 i 750 mm, przy zastosowaniu specjalnych nadstawek). Po zakończeniu zapłonu, który trwa 90 sekund, palnik odjeżdża automatycznie nad powierzchnię misy, a podciśnienie podczas zapalania przełącza się automatycznie z 8000 Pa na 17000 Pa. Czas trwania procesu spiekania liczony jest od momentu zapalania do osiągnięcia maksymalnej temperatury odciąganych spalin, mierzonej pod misą spiekalniczą (Rys. 7).

Po przekroczeniu maksymalnej temperatury, placek spieku jest chłodzony aż do momentu, gdy temperatura spalin mierzona pod misą osiągnie 40°C. Po wyłączeniu odciągu, mierzona jest odległość między górną częścią misy spiekalniczej a powierzchnią placka spieku, w celu oceny skurczu po spieczeniu mieszanki. W trakcie trwania procesu i do momentu osiągnięcia temperatury 40°C, mierzony jest skład spalin na zawartość O₂, CO₂, CO, SO₂, NO_x i CH₄ (Rys. 8), a stężenie pyłu w gazach odlotowych oznaczane jest gravimetrycznie.

2.4. IGNITION AND SINTERING OF THE MIXTURE WITH ANALYSIS OF FLUE GAS COMPOSITION AND TEMPERATURE MEASUREMENT

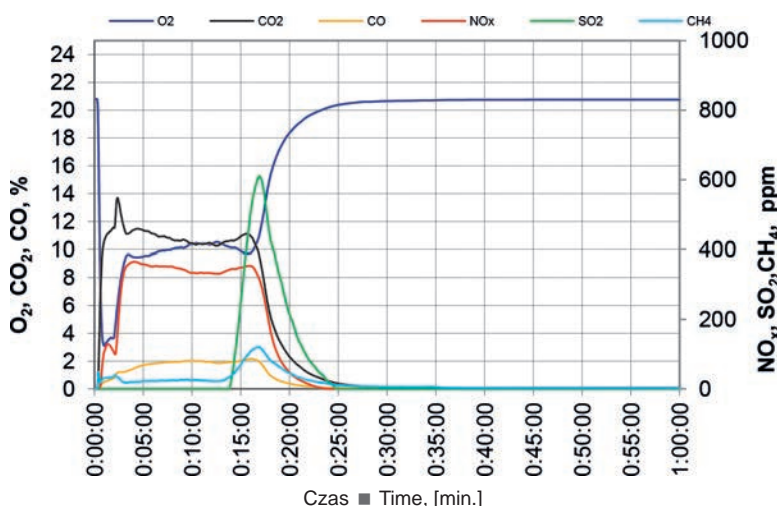
Sintering tests are usually carried out at a layer height of 550 mm (on the device it is possible to carry out tests with other heights of the sintered layer by changing the pan to a lower one – 300 mm as well as 450 and 750 mm, using special extensions). After completing the ignition, which lasts 90 seconds, the burner automatically moves away from the surface of the pan, and the vacuum during ignition switches automatically from 8000 Pa to 17000 Pa. The duration of the sintering process is counted from the moment of ignition until reaching the maximum temperature of the extracted flue gas, measured under the sintering pan (Fig. 7).

After exceeding the maximum temperature, the sinter cake is cooled until the flue gas temperature measured under the pan reaches 40°C. When the exhaust is switched off, the distance between the upper part of the sintering pan and the surface of the sinter cake is measured to assess the shrinkage after sintering the mixture. During the process and until reaching the temperature of 40°C, the composition of the flue gas for the content of O₂, CO₂, CO, SO₂, NO_x and CH₄ is measured (Fig. 8), and the dust concentration in the waste gas is determined gravimetrically.



Rys. 7. Zmiana temperatury spalin mierzona pod misą podczas spiekania mieszanki

Fig. 7. Change in flue gas temperature measured under the pan during mixture sintering



Rys. 8. Przykładowy skład spalin mierzonych podczas spiekania

Fig. 8. Sample composition of flue gases measured during sintering

2.5. WYŁADOWANIE PLACKA SPIEKU DO URZĄDZENIA ZRZUTOWEGO, PRZESIEWANIE SPIEKU I PONOWNA JEGO DEGRADACJA W URZĄDZENIU ZRZUTOWYM

Po wyładowaniu placka spieku z misy, spiek przenoszony jest do urządzenia zrzutowego, w którym z wysokości 2 metrów jest zrzucony. Spiek po pierwszym zrzucie jest wyładowany, ważony i przesiewany w celu oddzielenia frakcji poniżej 5 mm. Tę czynność powtarza się po następnych 3 oraz kolejnych 9 zrzutach. Urządzenie zrzutowe (Rys. 9) symuluje degradację spieku podczas różnych operacji transportowych (przenośniki, zsypy) między przesiewaniem na gorąco i na zimno występujących w warunkach spiekalni. Suma frakcji powyżej 5 mm stanowi tzw. „dobry spiek”, a spiek poniżej 5 mm określany jest jako spiek zwrotny.

2.6. MECHANICZNE I CHEMICZNE TESTY SPIEKU

W tym etapie określany jest skład granulometryczny „dobrego spieku” z wykorzystaniem przesiewacza (Rys. 10), a następnie ze spieku dobrego wykonywane są następujące czynności:

- analiza składu chemicznego
- oznaczanie wskaźników RDI i RI z wykorzystaniem frakcji spieku 10÷12,5 mm
- określenie wytrzymałości bębnowej ISO z użyciem frakcji spieku 10÷40 mm (Rys. 11).



Rys. 9. Urządzenie zrzutowe
Fig. 9. Discharging device

2.5. UNLOADING OF THE SINTER CAKE TO THE OUTLET DEVICE, SCREENING OF THE SINTER AND ITS RE-DEGRADATION IN THE OUTLET DEVICE

After unloading the sinter cake from the pan, the sinter is transferred to an outlet device, where it is discharged from a height of 2 metres. After the first discharge, the sinter is unloaded, weighed and screened to separate fractions below 5 mm. This operation is repeated after the next 3 and subsequent 9 discharges. The outlet device (Fig. 9) simulates sinter degradation during various transport operations (conveyors, chutes) between hot and cold screening occurring in sinter plant conditions. The sum of fractions above 5 mm is a “good sinter” and sinter less than 5 mm is referred to as return sinter.

2.6. MECHANICAL AND CHEMICAL SINTERING TESTS

At this stage, the granulometric composition of a “good sinter” is determined using a screen (Fig. 10), and then the following actions are carried out from the good sinter:

- chemical composition analysis
- determination of RDI and RI using a sinter fraction of 10–12.5 mm
- determination of the ISO drum strength using a sinter fraction of 10–40 mm (Fig. 11).



Rys. 10. Elektrowibracyjny przesiewacz pięciopokładowy do rozsiawiania spieków wielkopieczowych

Fig. 10. Electro-vibrating five-deck screen for spreading blast furnace sinters



Rys. 11. Bęben do oznaczania wytrzymałości spieku metodą ISO

Fig. 11. Drum for determining the sinter's strength using the ISO method

W zależności od programu badań, można wykonywać jeszcze oznaczenia właściwości termoplastycznych spieków oraz analizy fazowe spieku.

3. WYNIKI LABORATORYJNYCH BADAŃ PRÓB SPIEKANIA MIESZANKI RUD ŻELAZA

3.1. OKREŚLENIE WPŁYWU ZMIAN WARUNKÓW WSADOWYCH POPRZEC ZMIANĘ UDZIAŁU KONCENTRATÓW MAGNETYTOWYCH W MIESZANCE

Stosowane w procesie spiekania koncentraty rud żelaza posiadają bardzo drobne uziarnienie, w przeważającym udziale ziaren mniejszych od 0,1 mm (Rys. 12). Stosowanie tego typu materiału powoduje znaczne obniżenie przewodności na ruszcie taśmy spiekalniczej, a co za tym idzie – obniżenie wydajności procesu spiekania. Zwykle ilość koncentratów magnetytowych w mieszance mineralnej nie przekracza 50% udziału, a pozostała część mieszanki to drobnoziarniste aglorudy hematytowe o uziarnieniu do 8 mm.

Stosowanie dużych udziałów koncentratów magnetytowych w warunkach polskich hut podyktowane jest jego dostępnością (koncentraty rosyjskie) i wysoką zawartością Fe oraz relatywnie niższą ceną w porównaniu do kawałkowych rud, a zwłaszcza rud zamorskich.

W związku z tym w Łukasiewicz – IMŻ prowadzono badania laboratoryjne nad zwiększeniem udziału koncentratów magnetytowych w mieszance mineralnej. Udział ten zwiększano z 35, przez 55 do 75%, a próby prowadzono w układzie z dwoma rudami kawałkową rudą hematytową Krivbas i koncentratem magnetytowym KR. Średnie wyniki z tych badań zaprezentowano w tabeli 1 oraz na rys. 13 i 14.

Próby spiekania prowadzono przy stałej zasadowości i stałym dodatku wapna palonego 1,5% do mieszanki spiekalniczej. Zasadowość regulowano dodatkiem kamienia wapiennego. Z danych zaprezentowanych w tabeli 1 i na rys. 13, wynika, że zawartość Fe w spieku wzrasta wraz ze zwiększaniem się ilości koncentratu magnetytowego kosztem

Depending on the testing programme, sinter thermoplastic properties and sinter phase analyses may also be carried out.

3. RESULTS OF LABORATORY SINTERING TESTS FOR THE IRON ORE MIXTURE

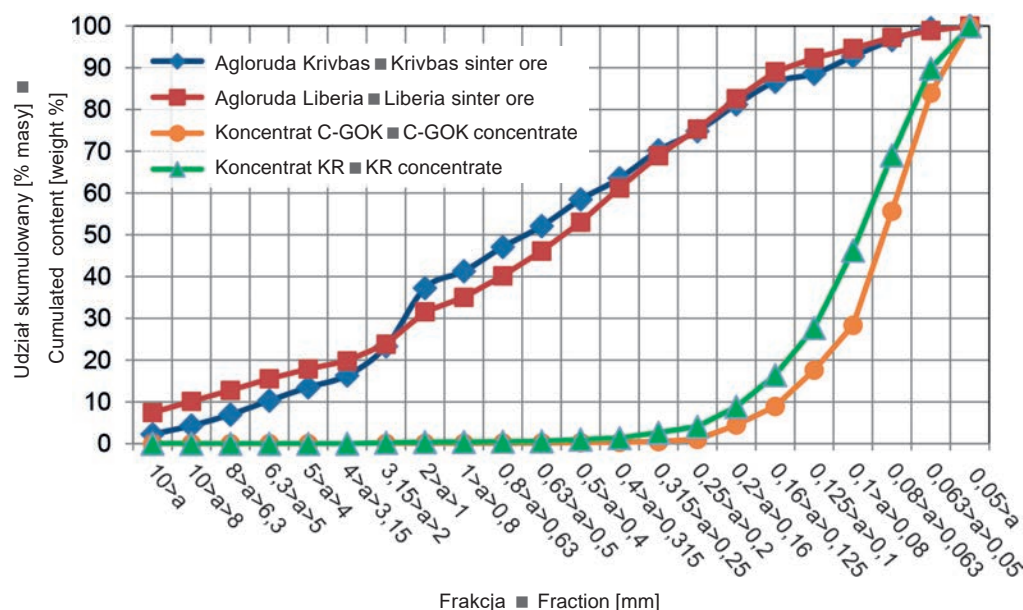
3.1. DETERMINATION OF THE IMPACT OF CHANGES IN INPUT CONDITIONS BY CHANGING THE CONTENT OF MAGNETITE CONCENTRATES IN THE MIXTURE

The iron ore concentrates used in the sintering process have very fine graining, with a predominant proportion of grains smaller than 0.1 mm (Fig. 12). The use of this type of material significantly reduces the aeration on the sinter belt grate, and thus reduces the sintering process efficiency. Usually the amount of magnetite concentrates in the mineral mixture does not exceed 50%, and the remaining part of the mixture is fine-grained hematite sinter ore with grain size up to 8 mm.

The use of large proportions of magnetite concentrates in the conditions of Polish steel mills is dictated by its availability (Russian concentrates) as well as high Fe content and a relatively lower price compared to coarse ores, especially overseas ores.

Therefore, the Łukasiewicz Research Network – Institute of Ferrous Metallurgy carried out laboratory tests to increase the proportion of magnetite concentrates in the mineral mixture. This content was increased from 35, through 55 to 75%, and the tests were carried out in a system with two ores, coarse hematite Krivbas ore and magnetite concentrate KR. The average results of these tests are shown in Table 1 and Figs. 13 and 14.

The sintering tests were carried out with constant alkalinity and a constant addition of 1.5% quicklime to the sinter mixture. Alkalinity was adjusted with a quicklime additive. From the data presented in Table 1 and Fig. 13, it follows that the content of Fe in the sinter increases with the increase in the



Rys. 12. Analiza granulometryczna rud drobnoziarnistych oraz koncentratów rud żelaza

Fig. 12. Granulometric analysis of fine-grained ores and iron ore concentrates

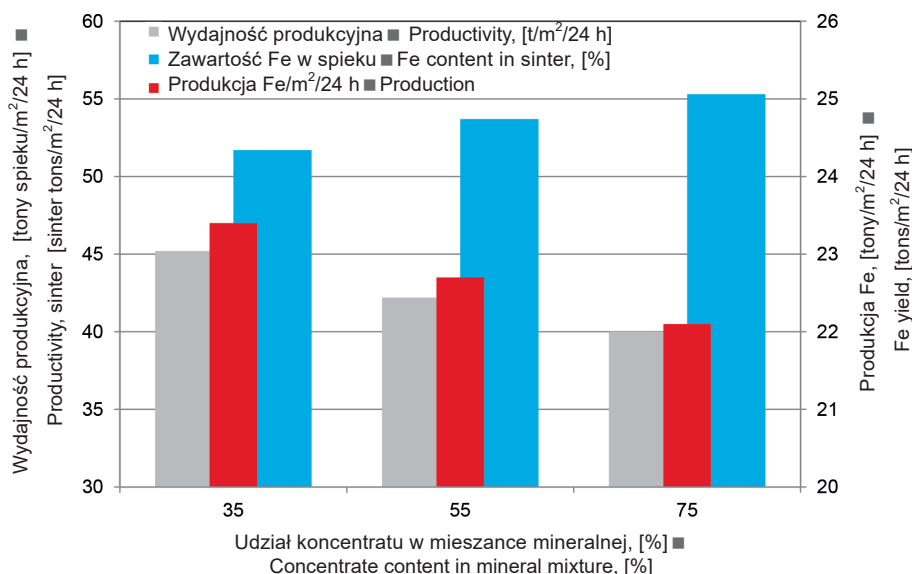
Tabela 1. Średnie wyniki prób spiekania ze zwiększaniem udziału koncentratu KR w mieszance spiekalniczej

Table 1. Average results of sintering tests with an increase in KR concentrate content in the sinter mixture

	Parametr ■ Parameter	Jednostka ■ Unit	35%	55%	75%
	Nazwa ■ Name		1	2	3
Podstawowe parametry procesu ■ Main operating results	Wskaźnik równowagi ■ Balance index	%	100,62	99,67	97,17
	Czas spiekania ■ Time of sintering	min	17,09	18,76	20,19
	Wydajność produkcyjna ■ Productivity	t/m ² /24h	44,06	41,17	39,16
	Maksymalna temperatura spalin ■ Maximum flue gas temperature	°C	475,30	493,26	424,53
	Jednostkowe zużycie paliwa ■ Solid fuel consumption	kg /t spieku ■ sinter	65,15	69,71	58,55
Analiza chemiczna spieku ■ Chemical analysis of sinter	Fe	%	51,68	53,75	55,16
	Fe ⁺⁺	%	6,60	7,71	6,95
	SiO ₂	%	10,62	9,23	8,60
	CaO	%	13,37	12,16	11,15
	Zasadowość ■ Basicity (CaO/SiO ₂)	-	1,26	1,32	1,30
	Al ₂ O ₃	%	1,22	1,02	0,82
	MgO	%	1,39	1,56	1,35
	S	%	0,030	0,020	0,020
Wytrzymałość spieku ISO ■ Sinter strength ISO	>6,3 mm: Wytrzymałość ■ Strength	%	65,53	64,42	70,62
	<0,5 mm: Ścieralność ■ Abrasion	%	5,10	5,40	5,69
RDI	<3,15 mm	%	27,28	22,30	21,46
RI	dR/dt _(O/Fe=0,9) , %/min	%	0,76	0,72	0,91
Zawartość w spalinach ■ Content in flue gases	O ₂	%	14,14	12,93	14,20
	CO ₂	%	8,21	8,82	8,10
	CO	%	1,16	1,53	1,14
	SO ₂	ppm	159	164	161
	NOx	ppm	90	154	134
	Pył ■ Dust	mg/Nm ³	33	26	18

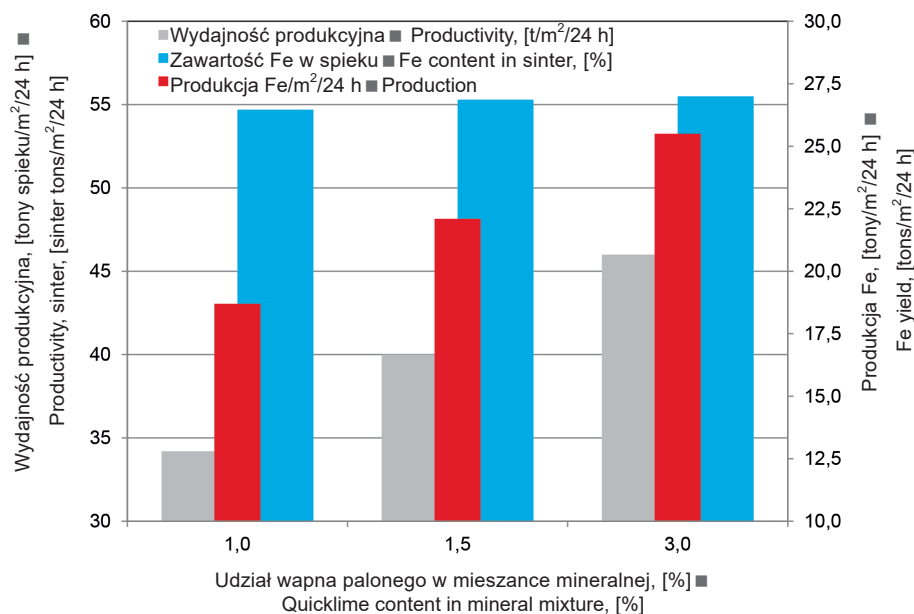
udziału drobnoziarnistej agrorudy hematytowej. Uzyskane wydajności są bardzo wysokie z powodu wyższego dodatku wapna palonego (15 kg/t spieku) oraz doskonałego procesu granulacji surowej mieszanki spiekalniczej w warunkach laboratoryjnych.

amount of magnetite concentrate at the expense of the content of fine-grained hematite sinter ore. The obtained yields are very high due to the higher addition of quicklime (15 kg/t of the sinter) as well as the result of an excellent granulation process of the raw sinter mixture in laboratory conditions.



Rys. 13. Wpływ udziału koncentratów w mieszance spiekalniczej na wydajność produkcyjną, produkcję żelaza oraz na zawartość żelaza w spieku

Fig. 13. Influence of concentrate content in sinter mixture on production efficiency, iron production and iron content in the sinter



Rys. 14. Wpływ dodatku wapna palonego do mieszanki spiekalniczej na wydajność produkcyjną, produkcję żelaza oraz na zawartość żelaza w spieku

Fig. 14. Influence of the addition of quicklime to the sinter mixture on production efficiency, iron production and iron content in the sinter

Przy okazji tych badań, określono również wpływu dodatku wapna palonego na wydajność produkcyjną co zaprezentowano na rys 14.

Przy ilości wapna palonego poniżej 15 kg/t spieku stwierdzono znaczną zmienność otrzymywanych wyników z prób spiekania. Optymalnym dodatkiem wapna palonego w analizowanych mieszankach jest dodatek 1,5%. Dalszy wzrost udziału wapna palonego prowadzi do wzrostu wydajności do ok. 44 t/m²/24 h, jednak znacznie zwiększa koszty wytwarzania spieku ze względu na cenę wapna palonego.

3.2. OKREŚLENIE WPŁYWU ZMIAN WARUNKÓW WSADOWYCH POPRZEC ZMIANĘ RODZAJU KONCENTRATÓW MAGNETYTOWYCH I RUD HEMATYTOWYCH W MIESZANCE

W celu określenia zmian warunków wsadowych poprzez zmianę poszczególnych komponentów mieszanki spiekalniczej, do badań wytypowano 4 rodzaje koncentratów magnetytowych oraz 3 rodzaje rud hematytowych. Następnie zdefiniowano i wykonano serię prób spiekania tzw. mieszanki referencyjnej (spiek porównawczy), do której odnoszono uzyskane wyniki z kolejnych prób spiekania. Mieszanka referencyjna składała się z 55% koncentratu KR i 45% rudy hematytowej Krivbas. Przebadano udział trzech koncentratów: koncentrat yński, C-GOK i Michajłowski, a w seriach badań z zamianą rud hematytowych, zamiast referencyjnej rudy Krivbas zastosowano dwie aglorudy – Zaporozie i Liberię przy towarzyszącym udziale koncentratu KR. Średnie wyniki z tych badań zaprezentowano w tabeli 2, oraz graficznie na rysunkach od 15 do 17.

W wyniku tych badań, stwierdzono, że w przypadku dwóch koncentratów (Lebiedyński i C-GOK) wydajność produkcyjna uległa zwiększeniu, przy towarzyszącym znacznym wzroście zawartości Fe w spieku. W przypadku koncentratu Michajłowskiego odnotowano nieznaczny wzrost wydajności, przy jednoczesnym wzroście zawartości Fe w spieku w porównaniu ze spiekami referencyjnym (Rys. 15).

W przypadku zamiany referencyjnej rudy Krivbas uzyskano wzrost wydajności przy zastosowaniu aglorudy Zaporozie

At the time of these studies, the effect of the addition of quicklime on production efficiency was also determined, which is presented in Fig. 14.

A significant variability of results obtained from the sintering tests was observed at the amount of quicklime below 15 kg/t of sinter. The optimal addition of quicklime in the analysed mixtures is the addition of 1.5%. A further increase in the share of quicklime leads to an increase in efficiency to approx. 44 t/m²/24 h, however, it significantly increases the cost of sinter production due to the price of quicklime.

3.2. DETERMINATION OF THE IMPACT OF CHANGES IN INPUT CONDITIONS BY CHANGING THE TYPE OF MAGNETITE CONCENTRATES AND HEMATITE ORES IN THE MIXTURE

In order to determine changes in input conditions by changing individual components of the sinter mixture, 4 types of magnetite concentrates and 3 types of hematite ores were selected for testing. Then, a series of sintering tests was defined and performed for a reference mixture (comparative sinter) to which the obtained results from subsequent sintering tests were referred. The reference mixture consisted of 55% of the KR concentrate and 45% of the Krivbas hematite ore. The content of three concentrates was studied: Lebiedynsky concentrate, C-GOK and Michajlovsky concentrate, and in the series of tests with hematite ore replacement, instead of the reference Krivbas sinter ore, two sinter ores were used – Zaporovsky and Liberia with the accompanying KR concentrate. The average results of these tests are shown in Table 2 and graphically in Figs. 15 to 17.

As a result of these tests, it was found that in the case of two concentrates (Lebiedynsky and C-GOK), the production capacity increased, accompanied by a significant increase in the content of Fe in the sinter. In the case of the Michajlovsky concentrate, a slight increase in efficiency was noted, with a simultaneous increase in the Fe content in the sinter compared to the reference sinter (Fig. 15).

Tabela 2. Wyniki prób spiekania przy zmianie rodzaju koncentratów magnetytowych i rud hematytowych w mieszance

Table 2. Results of sintering tests when changing the type of magnetite concentrates and hematite ores in the mixture

	Parametr	Jednostka ■ Unit	Mieszanka referencyjna ■ Reference mixture	Lebiedyński ■ Lebiedynsky	C-GOK	Michajłowski ■ Michajlovsky	Zaporoże ■ Zaporovsky	Liberia
	Nazwa		Średnie wartości ■ Average values					
Podstawowe parametry procesu ■ Basic process parameters	Wskaźnik równowagi ■ Balance index	%	97,58	100,85	99,25	100,86	97,72	102,31
	Czas spiekania ■ Time of sintering	min	21,83	19,32	18,49	21,37	21,75	24,04
	Wydajność produkcyjna ■ Productivity	t/m ² /24 h	36,58	41,38	43,94	37,35	38,88	32,87
	Maksymalna temperatura spalin ■ Maximum flue gas temperature	°C	328,4	346,3	348,6	326,6	327,58	308,47
	Jednostkowe zużycie paliwa ■ Specific fuel consumption	kg / t spieku	57,85	58,67	57,21	59,63	50,56	57,78
Analiza chemiczna spieku ■ Chemical analysis of sinter	Fe	%	55,8	57,14	57,16	56,18	56,48	56,23
	FeO	%	7,47	9,3	8,98	7,91	7,23	8,37
	SiO ₂	%	8,63	7,97	7,82	8,53	8,26	8,38
	CaO	%	10,49	9,65	9,5	10,17	9,8	9,93
	Zasadowość ■ Basicity (CaO/SiO ₂)	–	1,22	1,21	1,21	1,19	1,19	1,19
	MgO	%	1,28	1,33	1,31	1,33	1,32	1,32
	Al ₂ O ₃	%	0,9	0,9	0,91	0,83	0,67	0,98
S	%	0,020	0,016	0,012	0,017	0,02	0,02	
Wytrzymałość spieku ISO ■ Sinter strength ISO	>6,3 mm: Wytrzymałość ■ Strength	%	71,21	68,42	69,13	69,52	71,85	69,28
	<0,5 mm: Ścieralność ■ Abrasion	%	6,05	5,87	6,01	6,12	5,74	6,54
RDI	<3,15 mm	%	18,76	25,07	29,28	21,48	22,6	18,15
RI	dR/dt _(O/Fe=0,9) , %/min	%	0,75	0,82	0,71	0,83	0,78	0,57
Zawartość w spalinach ■ Content in flue gases	O ₂	%	13,47	13,67	13,45	13,41	13,95	14,50
	CO ₂	%	7,55	7,54	7,7	8	7,18	6,66
	CO	%	1,4	1,38	1,29	1,43	1,07	1,06
	SO ₂	ppm	345	537	236	90	301	338
	NO _x	ppm	225	193	195	271	197	190
	Pył ■ Dust	mg/Nm ³	919	694	852	799	308	250

że z równoczesnym wzrostem zawartości żelaza w spieku. Stosowanie rudy Liberia spowodowało znacznie obniżenie wydajności produkcyjnej (z ok. 36,6 do ok. 32,9 t/m²/24 h), przy jednoczesnym korzystnym wzroście zawartości Fe w spieku z powodu jego wyższej zawartości w tej rudzie (Rys. 16).

Najwyższą wytrzymałością ISO T charakteryzował się spiek otrzymany z mieszanki złożonej z rudy Zaporoże oraz koncentratu KR w porównaniu do spieku otrzymanego z mieszanki referencyjnej i wynosił ponad 70%, a najniższy wskaźnik wytrzymałości uzyskano dla spieku otrzymanego z mieszanki składającej się z rudy Krivbas i koncentratu Lebiedyńskiego.

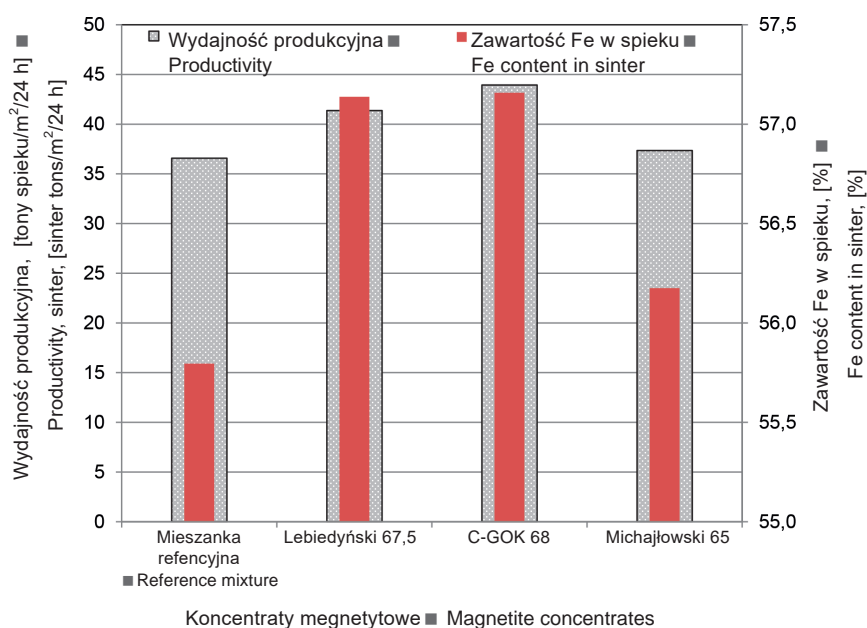
Najkorzystniejszy wskaźnik RDI-1-3,15 uzyskano dla spieku wytworzonego z mieszanki składającej się z koncentratu KR i rudy Liberii.

Na wskaźnik RDI głównie ma wpływ zawartość Al₂O₃, jednak ze względu na niską zmienność zawartości Al₂O₃ w spieku, takiej zależności nie stwierdzono.

In the case of the substitution of the reference Krivbas ore, an increase in efficiency was obtained when using the Zaporovsky sinter ore with a simultaneous increase of iron in the sinter. The use of Liberia ore resulted in a significant reduction in production efficiency (from approx. 36.6 to approx. 32.9 t/m²/24 h), with a simultaneous favourable increase in Fe content in the sinter due to its higher content in this ore (Fig. 16).

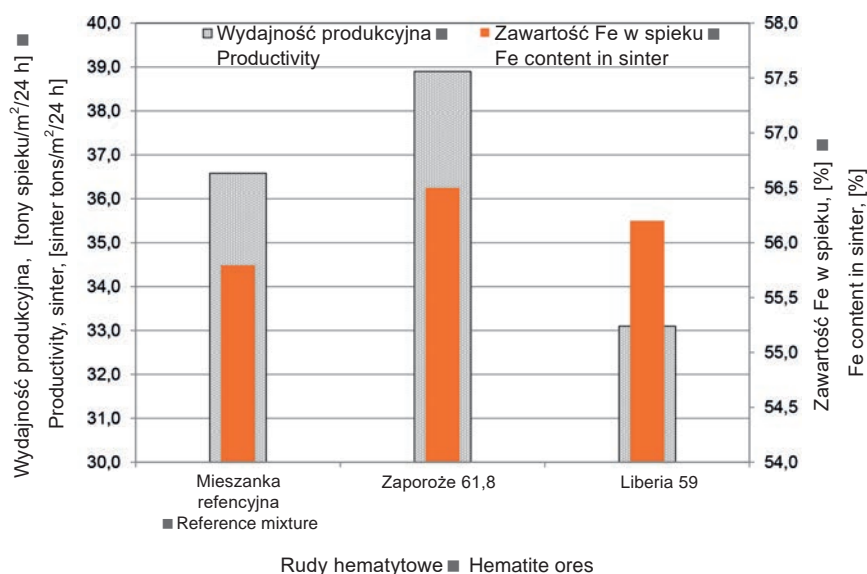
The highest ISO T strength was characteristic for the sinter obtained from a mixture composed of the Zaporovsky ore and KR concentrate compared to the sinter obtained from a reference mixture, and was over 70%, and the lowest strength index was achieved for the sinter obtained from a mixture consisting of the Krivbas ore and Lebiedynsky concentrate.

The most favourable RDI-1-3,15 was obtained for the sinter obtained from the mixture consisting of the KR concentrate and Liberia ore.



Rys. 15. Wpływ udziału koncentratów w mieszance spiekalniczej na wydajność produkcyjną, produkcję żelaza oraz na zawartość żelaza w spieku w porównaniu do mieszanki referencyjnej

Fig. 15. Influence of concentrate content in sinter mixture on production efficiency, iron production and iron content in the sinter in comparison to the reference mixture



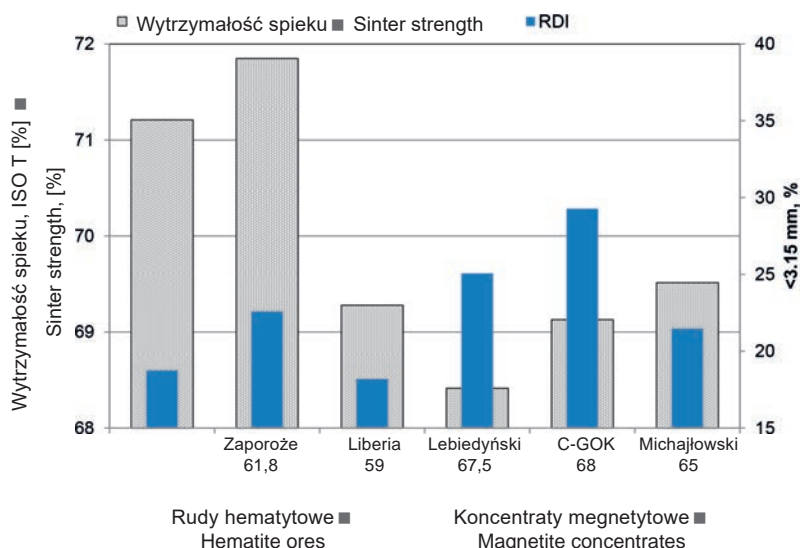
Rys. 16. Wpływ zamiany rudy Krivbas w mieszance spiekalniczej innymi rudami na wydajność produkcyjną, produkcję żelaza oraz na zawartość żelaza w spieku w porównaniu do mieszanki referencyjnej

Fig. 16. Influence of the substitution of the Krivbas ore with other ores in the sinter mixture on production efficiency, iron production and iron content in the sinter in comparison to the reference mixture

Najniższe zużycie paliwa, które wynosiło 50,6 kg/t spieku, uzyskano przy produkcji spieku z mieszanki składającej się z rudy Zaporozhe i koncentratu KR (Rys. 18). Zmienność zużycia paliwa stałego w koncentraty nie jest znacząca, ponieważ wszystkie badane koncentraty są magnetytami w zasadzie o jednakowych stratach prażenia.

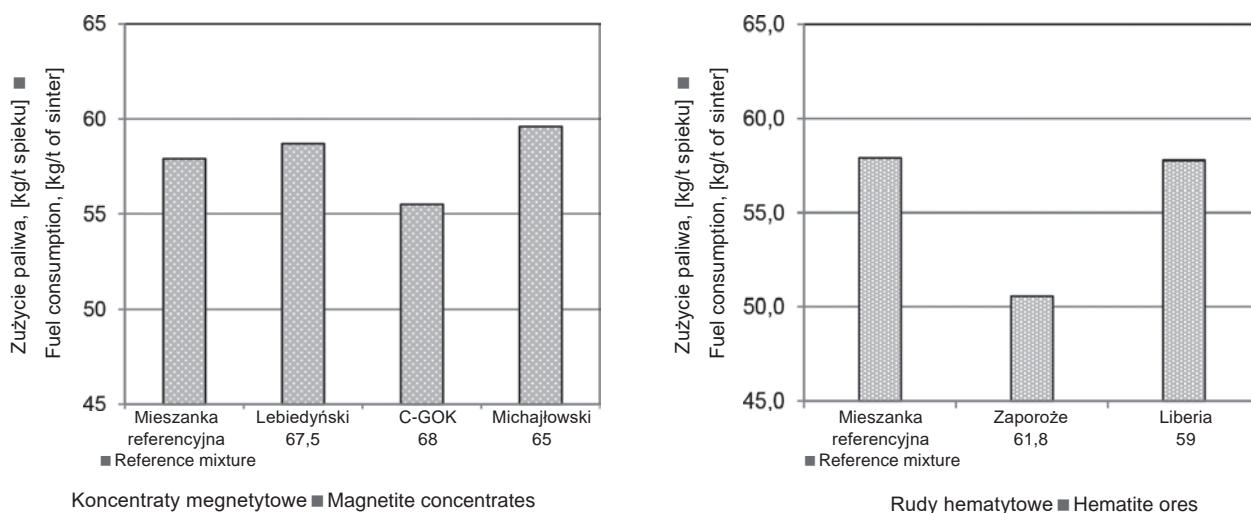
RDI is mainly affected by the Al_2O_3 content, however, due to the low variability of the Al_2O_3 content in the sinter, no such relationship was found.

The lowest fuel consumption, which was 50.6 kg/t of sinter, was obtained in the production of sinter from a mixture consisting of the Zaporovskiy ore and KR concentrate (Fig. 18). The variability of solid fuel consumption in the concentrates is not significant, because all the tested concentrates are magnetites with essentially equal roasting losses.



Rys. 17. Wyniki badań właściwości spieku otrzymanego z mieszanek przy zastąpieniu referencyjnej rudy Krivbas rudą Zaporozie i Liberią, oraz zamiany koncentratu KR koncentratami Lebiedyńskim, C-GOK i Michajłowskim

Fig. 17. Results of the examination of sinter properties obtained from mixtures after the replacement of the reference Krivbas ore with Zaporovsky and Liberia ore, and the replacement of the KR concentrate with the Lebiedyńsky, C-GOK and Michajlovsky concentrates



Rys. 18. Wpływ zastąpienia referencyjnej rudy Krivbas rudą Zaporozie i Liberią, oraz zamiany koncentratu KR koncentratami Lebiedyńskim, C-GOK i Michajłowskim na jednostkowe zużycie paliwa

Fig. 18. Impact of replacing the reference Krivbas ore with the Zaporovsky and Liberia ores, and the substitution of the KR concentrate with the Lebiedyńsky, C-GOK and Michajlovsky concentrates on unit fuel consumption

4. PODSUMOWANIE

Nowoczesna linia do półprzemysłowej symulacji procesu spiekania, będąca na wyposażeniu Zakładu Procesów Surowcowych, stwarza szerokie możliwości badawcze. Z jej wykorzystaniem realizowane są badania procesu spiekania mieszanek z różnym udziałem różnych rud kawałkowych i koncentratów, a także z udziałem paliw alternatywnych oraz odpadów (pyłów, szlamów).

Wykonywane programy prób spiekania zgodnie z przedstawioną metodologią są pomocne w ustalaniu optymalnych składów mieszanek spiekalniczych gwarantujących wysoką wydajność procesu, wysokie właściwości fizykochemiczne spieku i niskie koszty wytwarzania spieku.

Stosowana metodologia badań zapewnia poprawność i powtarzalność uzyskiwanych wyników.

4. SUMMARY

A modern line for semi-industrial simulation of the sintering process, being the equipment of the Department of Primary Processes, creates broad research possibilities. With its use, research is carried out on the sintering process of mixtures with different content of various coarse ores and concentrates, as well as with the use of alternative fuels and waste (dust, sludge).

The sintering test programmes carried out in accordance with the presented methodology are helpful in determining the optimal compositions of sinter mixtures guaranteeing high process efficiency, high physicochemical properties of the sinter and low costs of sinter production.

The research methodology used ensures the correctness and repeatability of the obtained results.

LITERATURA ■ REFERENCES

- [1] J. Stecko, R. Stachura, M. Niesler, M. Bernasowski, A. Klimczyk. Utilisation of metallurgical sludge by multi-layer sintering. *Iron-making & Steelmaking* 2018, 45 (9), s. 779-786.
- [2] J. Stecko, M. Niesler. Badania nad zastosowaniem osadów zawierających żelazo pochodzących z oczyszczania wody, jako zamiennika części wsadu rudnego w procesie spiekania rud żelaza. *Prace Instytutu Metalurgii Żelaza*, 2017, 69 (2), s. 21-30.
- [3] J. Stecko, M. Niesler, D. Gierad, M. Nowak, S. Stelmach. Ocena możliwości zastosowania karbonizatu z opon jako zamiennika części paliwa stałego w procesie spiekania rud żelaza. *Prace Instytutu Metalurgii Żelaza*, 2017, 69 (3), s. 39-44.
- [4] M. Niesler, J. Stecko. Laboratoryjna weryfikacja niektórych konkluzji BAT dla spiekalni rud. *Prace Instytutu Metalurgii Żelaza*, 2016, 68 (3), s. 14-20.
- [5] M. Niesler, J. Stecko, S. Stelmach, M. Nowak. Ocena możliwości wykorzystania „błękitnego węgla” jako zamiennika części koksiku w procesie spiekania rud żelaza. *Prace Instytutu Metalurgii Żelaza*, 2017, 69 (2), s. 31-43.
- [6] M. Niesler, J. Stecko, L. Blacha, B. Oleksiak. Application of fine-grained coke breeze fractions in the process of iron ore sintering. *Metalurgija*, 2014, 53 (1), s. 37-39.
- [7] J. Stecko, M. Niesler. Ocena możliwości całkowitego zastąpienia koksiku antracytem w procesie spiekania. *Prace Instytutu Metalurgii Żelaza*, 2012, 64 (3), s. 77-82.
- [8] Polski Komitet Normalizacyjny. PN-ISO 3082: 2002. *Rudy żelaza. Procedury pobierania i przygotowania próbek*. Warszawa: PKN 1999.
- [9] Polski Komitet Normalizacyjny. PN-ISO 8263: 1999. *Miałkie rudy żelaza. Metoda przedstawiania wyników prób spiekania*. Warszawa: PKN 1999.