



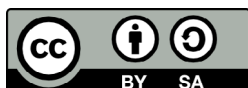
Bartosz MERTAS¹, Marek ŚCIAŻKO¹

Zmienność właściwości węgla koksowych w zależności od ich uziarnienia

Streszczenie: Efektywną, stabilną i niezawodną pracę wielkiego pieca zabezpiecza odpowiedniej jakości koks, który jest jednym z podstawowych składników wsadu. We współczesnej technologii wielkopiecowej, przy stosowaniu paliw zastępczych, tj. pyłu węglowego, rola koksu jest niezwykle istotna. Z tego powodu wymagania stawiane jego jakości wzrastają. Krajowe koksownie mają do dyspozycji ograniczoną bazę krajowych wysokojakościowych węgla koksowych, a równocześnie węgle zamorskie są kosztowe, dlatego pełne wykorzystanie ich właściwości koksotwórczych jest niezwykle istotne. Skład ziarnowy mieszanki wsadowej jest jednym z podstawowych czynników wpływających na jakość produkowanego koksu. Wpływ ten uzależniony jest od udziału ilościowego i jakości poszczególnych komponentów tworzących mieszankę wsadową. W przeprowadzonych badaniach 21 węgla koksowych, różniących się istotnie stopniem uwęglenia oraz pochodzeniem (węgle polskie i zamorskie), wykazano, że wydzielone klasy ziarnowe różnią się właściwościami, zarówno koksotwórczymi, jak i zachowaniem w trakcie ogrzewania. Analizując uzyskane wyniki zmian wielkości pojedynczych ziaren, zaobserwowano, że przyrost ich objętości zasadniczo występuje w zakresie temperatur pomiędzy początkiem a maksimum plastyczności. Wykazano, że istnieje liniowa korelacja pomiędzy temperaturą odpowiadającą maksymalnej plastyczności oraz temperaturą, w której wstępuje maksymalna szybkość wydzielania się części lotnych. Przedstawione rezultaty potwierdzają istotny wpływ wielkości ziaren węglowych na ich właściwości, co w konsekwencji wpływa na jakość produkowanego z nich koksu. Wnioski mogą zostać wykorzystane w zakładach koksowniczych do określenia optymalnego przemiału węgla do procesu koksowania.

Słowa kluczowe: selektywny przemiał, klasa ziarnowa, właściwości koksownicze

¹ Instytut Chemicznej Przeróbki Węgla, Zabrze; e-mail: bmertas@ichpw.pl



Coking coal properties changes depending on grain size fraction

Abstract: The efficient, stable and reliable operation of the blast furnace secures the proper quality of coke, which is one of the basic components of the blast furnace charge. In modern blast-furnace technology, when using substitute fuels, i.e. coal dust, the role of coke is extremely important. For this reason, the demands placed on its quality increase. Domestic coking plants have a limited base of Polish high quality coking coals at their disposal, therefore the full use of their coking properties is extremely important. The grain composition of the coal blend is one of the basic factors affecting the quality of the produced coke. This influence depends on the quantity and quality of coal components that make up the blend. In the conducted research, 21 coking coals, differing significantly in the degree of rank and origin (Polish and overseas coals), it was shown that the separated grain classes differ in properties, both coking properties and the degree of devolatilization during heating. In analyzing the obtained results, it was observed that the grain volume growth occurs essentially in the temperature range between the beginning and the maximum of fluidity. It has been shown that there is a linear correlation between the temperature corresponding to maximum fluidity and the temperature at which the maximum rate of evolution of volatiles enters. The presented phenomena accompany the emergence of coal expansion pressure during the coking process and they are its primary causes. The presented results can be an important guide for preparing the milling of coal for the coking process.

Keywords: selective grinding, grain size fraction, coking properties

Wprowadzenie

Jakość koksu, stosowanego w procesie produkcji żelaza, jest jednym z głównych czynników, które zabezpieczają efektywną, stabilną i niezawodną pracę wielkiego pieca. W procesie wytwarzania surówki żelaza koks wielkopiecowy w ciągu najbliższych kilkudziesięciu lat odgrywać będzie w dalszym ciągu ważną rolę. W nowoczesnej technologii wielkopiecowej, ograniczającej jednostkowe zużycie koksu poprzez stosowanie paliw zastępczych – głównie pyłu węglowego (technologia PCI – *Pulverized Coal Injection*), rola koksu jako rusztowania zabezpieczającego przewiewność słupa wsadu w dolnych częściach wielkiego pieca, gdzie składniki żelazonośne wsadu mięknią i przechodzą w stan ciekły, jest niezwykle istotna. Przy stosowaniu tej technologii rosną wymagania w stosunku do jakości koksu. Krajowe koksownie mają do dyspozycji ograniczoną bazę krajowych wysokojakościowych węgla koksowych, zatem konieczny jest również import drogich węgla zamorskich (Kosewska i Wróbelka 2009).

Podstawowymi składnikami mieszanek wsadowych są polskie węgle typu 34 (*semi-soft*) i 35 (*hard*). Procentowy udział węgla poszczególnych typów w mieszance wsadowej determinowany jest rodzajem produkowanego koksu. Wraz z rosnącym udziałem koksu metalurgicznego w ogólnej produkcji, procentowy udział węgla typu *hard* rośnie. Wyższe zużycie związane jest głównie z eksportem koksu, gdzie wysokie wymagania importerów w stosunku do parametrów jakościowych koksu, wymuszają stosowanie do jego produkcji mieszanek wsadowych z dużym udziałem najlepszych krajowych węgla ortokoksowych oraz węgla zamorskich. W ostatnich latach, mimo zwiększenia dostaw węgla typu 35 z kopalń JSW SA, potrzeby koksownictwa w zakresie węgla tego typu nie mogą być w pełni pokryte. Koksownie niedobory węgla pokrywają importem z Republiki Czeskiej oraz z krajów zamorskich. W 2017 roku łączny import węgla koksowych wynosił około 3,63 mln ton (Eurostat 2019). Import z krajów zamorskich dotyczy głównie potrzeb grupy ArcelorMittal Poland.

Węgłe zamorskie charakteryzują się właściwościami pozwalającymi na produkcję koksu metalurgicznego o bardzo dobrych parametrach jakościowych, oczekiwanych przez odbiorców zagranicznych, szczególnie z Europy Zachodniej. Równocześnie właściwości te, w tym niska zawartość części lotnych i niska plastyczność sprzyjają generowaniu bardzo wysokiego ciśnienia koksovania, czyli mogą powodować uszkodzenie bądź zniszczenie masywu ceramicznego baterii koksoowniczej (Karcz i Strugała 2001; Mertas 2014). Problem szybkiej i wiarygodnej oceny w skali laboratoryjnej przesłanek decydujących o wielkości ciśnienia generowanego przez węgle oraz mieszanki węglowe z ich udziałem staje się zatem zagadnieniem niezwykle istotnym.

W procesie koksovania, właściwości węgla wsadowego przekładają się bezpośrednio na parametry jakościowe koksu. Istotnym wskaźnikiem jakościowym wsadu węglowego, decydującym o pełnym wykorzystaniu w procesie koksovania właściwości koksotwórczych węgla, jest jego skład ziarnowy. Czynnikiem wpływającym na uziarnienie węgla wsadowego są: skład ziarnowy węgla handlowego oraz operacje mielenia przewidziane w technologii przygotowania wsadu do procesu koksovania (Kosewska i Wróbelka 2003; Karcz i Strugała 2008). Dobre przygotowanie wsadu węglowego winno zatem wziąć pod uwagę zmienność właściwości fizykochemicznych węgla wraz ze zmianą uziarnienia.

1. Węgłe stosowane w polskim koksownictwie

Polska jest największym producentem węgla kamiennego w Unii Europejskiej, a na świecie lokuje się na 9–10 pozycji (Gawlik 2013). Wśród producentów węgla koksowego dominującą rolę odgrywa Jastrzębska Spółka Węglowa SA, szczególnie po przejęciu od Kompanii Węglowej SA kopalni Knurów-Szczygłowice. Zasoby operatywne węgla w JSW szacowane są na 977 mln Mg, w czym węgiel koksowy stanowi około 72% (Dyczko 2018).

W Polskiej Grupie Górniczej SA w zasobach operacyjnych węgla znajduje się około 1,7 mld Mg (Hochul 2017; Rogala i in. 2017), w czym około 97% stanowi węgiel energetyczny, a około 3% stanowi węgiel koksowy (Cebo 2017).

Procentowy udział węgla typu 34 i 35 w mieszance wsadowej determinowany jest rodzajem produkowanego koksu. Zazwyczaj w polskim koksownictwie udział węgla typu 35 wynosi około 70% we wsadzie zasypowym i około 60% we wsadzie ubijanym. Od początku XXI wieku w polskim koksownictwie zmianom uległa struktura produkowanego koksu, czemu towarzyszyły zmiany jakościowe mieszanek wsadowych objawiające się coraz większym zużyciem węgla typu 35. Wyższe zużycie związane było głównie z realizacją eksportowej produkcji koksu, która wzrosła w ostatnich 20 latach dwukrotnie.

2. Wpływ uziarnienia węgla wsadowego na jego właściwości oraz jakość koksu

Skład ziarnowy mieszanki wsadowej jest jednym z podstawowych czynników wpływających na jakość produkowanego koksu. Wpływ ten uzależniony jest od udziału ilościowego

i jakości komponentów węglowych tworzących mieszankę wsadową. Dobór właściwego składu ziarnowego mieszanki wsadowej, który jest funkcją przemiału poszczególnych jej składników, jest zadaniem bardzo trudnym, ze względu na duże zróżnicowanie właściwości koksotwórczych poszczególnych komponentów oraz wzajemne oddziaływanie pomiędzy ich ziarnami w procesie koksowania.

W praktyce przemysłowej optymalizacja uziarnienia mieszanki sprowadza się w większości przypadków do ustalenia stopnia jej przemiału, definiowanego jako procentowy udział ziaren poniżej 3 mm. Przy jego doborze kieruje się:

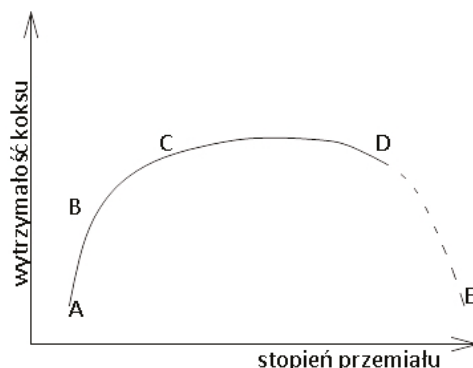
- wymaganiami jakościowymi koksu,
- maksymalnym wykorzystaniem „potencjału spiekalności” węgla wchodzących w skład mieszanki,
- właściwościami poszczególnych klas ziarnowych każdego z komponentów mieszanki,
- uzyskaniem możliwie wysokiej gęstości nasypowej mieszanki (Rozwadowski 2008; Karcz i Strugała 2008).

Zasadniczo w technologii przygotowania mieszanki wsadowej do procesu koksowania, dąży się do zawężenia rozpiętości granic uziarnienia, a więc maksymalnego wyeliminowania ziaren grubych, przy jednoczesnym ograniczaniu zawartości najdrobniejszych frakcji ziarnowych. Obniżanie górnej granicy wielkości ziaren wpływa na zmniejszenie niepożądanego szczelinowatości koksu, natomiast minimalizacja zawartości frakcji pyłowych we wsadzie jest równoznaczna z poprawieniem jego właściwości plastycznych, co sprzyja tworzeniu się koksu o zwartej, wytrzymałej strukturze.

Problematyce racjonalnego rozdrabniania węgla, jako jednemu z podstawowych czynników umożliwiających poprawę jakości koksu, poświęcano wiele uwagi, tak w przeszłości, jak i obecnie. Badania wykazały, że optymalne wartości wskaźników: zdolności spiekania RI, wolnego wydymania SI, parametrów plastometrycznych, osiągają ziarna o rozmiarach 0,75 mm (klasa ziarnowa 0,5–1,0 mm). Regularność tę odnotowano dla wszystkich analizowanych rodzajów węgla: koncentratu węglowego, flotacyjnego i mułu odpadowego z procesów wzbogacania. Stwierdzono również, że cząstki węgla o wielkości 0,13 mm, są ziarnem o granicznym rozmiarze, poniżej którego następuje gwałtowny spadek zdolności spiekania węgla. Potwierdza to negatywny wpływ tej klasy ziarnowej na jakość koksu (Kosewska i Wróbelka 2003; Nikitin 1997).

W rozważaniach nad ogólnym charakterem zależności dowolnego wskaźnika wytrzymałości mechanicznej koksu od stopnia przemiału wsadu węglowego, opartych na analizie procesu tworzenia się koksu, autorzy (Kosewska i Wróbelka 2003; Formin i Serga 1982; Tajc 1961) przytaczają charakterystyczną krzywą przebiegu tej zależności, którą obrazuje rysunek 1. W obszarze niskich przemiałów (odcinek AB krzywej), zmniejszenie uziarnienia wsadu węglowego istotnie poprawia wytrzymałość mechaniczną koksu. Podczas mielenia węgla następuje głównie wyeliminowanie ziaren o dużych rozmiarach (>6 mm), powodujące zmniejszenie wewnętrznych naprężeń w koksowanym wsadzie, a więc i ilość powstających szczelin w koksie. Przy dalszym jego rozdrobnieniu wytrzymałość koksu maleje (D–E).

Wyniki prac zrealizowanych w ramach wcześniejszego projektu badawczego (Karcz i in. 2002) wskazały, że konieczne jest przeprowadzenie badań nie całej mieszanki węgla o szerokim spektrum uziarnienia, a wydzielenie z niego frakcji ziarnowych o ograniczonym



Rys. 1. Zależność wytrzymałości koksu od stopnia przemiału (Kosewska i Wróbelka 2003)
 AB – obszar niskich przemiałów, poprawa wytrzymałości mechanicznej koksu,
 BC – przechodzenie krzywej w obszar, gdzie wytrzymałość koksu praktycznie nie ulega zmianie wraz ze zmianą stopnia przemiału, CD – obszar braku wpływu stopnia przemiału na wytrzymałość koksu,
 DE – przekroczenie punktu granicznego pozytywnego wpływu stopnia przemiału na wytrzymałość koksu

Fig. 1. Coke strength change depending on grain size distribution
 AB – low grinding area, improvement of coke mechanical strength, BC – transition to the area where the coke strength practically does not change with the change of the milling degree,
 CD – the area with no influence of the milling degree on coke strength,
 DE – exceeding the limit point of the positive effect of the milling degree on the coke strength

zakresie. Pozwala to w znacznie lepszy sposób ocenić prawdopodobny wpływ węgla na jego cieśninie rozprężania i zdolności do tworzenia dobrego koksu.

3. Właściwości fizykochemiczne badanych węgli

Przedmiotem badań były węgle kamienne stosowane do produkcji koksu pochodzące z Polski, jak również zamorskie (USA, Kanada, Australia). Dla wybranych węgli wydzielano 3 lub 4 frakcje ziarnowe, dla których wykonano następujące badania ich właściwości:

- oznaczanie zawartości wilgoci, popiołu i części lotnych – według PN-G-04560:1998,
- oznaczanie zdolności spiekania metodą Rogi – według PN-G-04518:1981,
- oznaczanie wskaźnika wolnego wydymania – według PN-81/G-04515/ PN-ISO 501:2007,
- oznaczanie parametrów plastyczności met. Gieselera – według PN-G-04565:1994,
- oznaczanie składu macerałów, grup macerałów i substancji mineralnej – według PN-92/G-04529 / PN-ISO 7404-3:2001,
- oznaczanie refleksyjności wityryny – według PN-92/G-04524 / PN-ISO 7404-5:2002.

Dla wybranych węgli wykonano dodatkowo analizę termogravimetryczną z zastosowaniem analizatora TGA-501 firmy LECO – według procedury własnej IChPW. Analizę prowadzono dla wszystkich badanych węgli w stałych warunkach: szybkość ogrzewania 5 K/min, temperatura końcowa 900°C, atmosfera azotu. Wykonana dla wszystkich próbek

węgla analiza termogravimetryczna miała na celu scharakteryzowanie węgla pod względem wydajności produktów lotnych w trakcie procesu pirolizy, szczególnie w obszarze stanu plastycznego oraz opracowanie modelu pirolizy węgla w tym zakresie.

Wszystkie badania właściwości węgla wykonane zostały w Laboratorium Paliw i Węgla Aktywnych Instytutu Chemicznej Przeróbki Węgla, które od 1996 roku posiada certyfikat akredytacji laboratorium badawczego Nr AB 081, wydany przez Polskie Centrum Akredytacji. Właściwości analizowanych węgla przedstawiono w tabeli 1. Kolorem szarym oznaczono węgiel polski, pozostałe to węgle zamorskie.

TABELA 1. Właściwości analizowanych węgla

TABLE 1. Coal properties

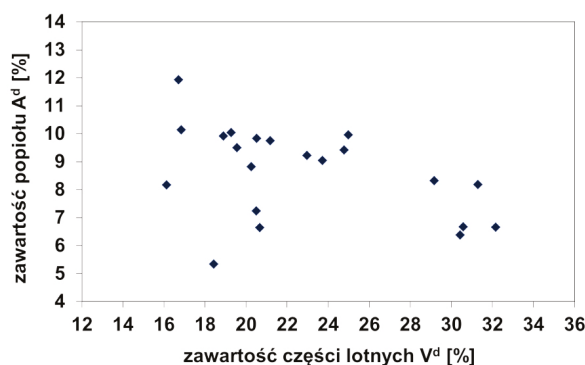
Parametr		Nr próbki										
		8052	8053	8054	8055	8056	8057	8058	8059	8060	8061	
W ^a	[%]	1,5	1,1	2,3	1,3	1,4	1,4	1,9	1,2	1,1	1,3	
A ^d	[%]	9,0	9,9	6,7	9,2	10,0	8,8	7,2	9,4	6,7	10,1	
V ^{daf}	[%]	26,07	20,99	34,45	25,30	21,43	22,22	22,10	27,35	32,76	18,75	
RI	[-]	68	63	81	72	63	55	67	44	86	43	
t ₁	[°C]	404	420	386	397	423	418	414	382	370	436	
t _{max}	[°C]	454	467	432	456	468	463	463	444	433	472	
t ₃	[°C]	484	490	467	488	489	491	490	476	483	492	
F _{max}	[ddpm]	63	18	1884	262	18	33	20	176	24 042	2	
R	[%]	1,06	1,39	0,97	1,05	1,28	1,23	1,29	1,05	0,92	1,46	
V	[%]	71	73	79	74	68	69	69	57	65	84	
Parametr		Nr próbki										
		8062	8063	8064	8065	8066	8067	8068	8069	888	889	890
W ^a	[%]	1,3	1,1	2,1	1,5	1,1	0,8	0,7	1,6	1,1	1	1,5
A ^d	[%]	9,8	11,9	6,6	9,7	9,5	8,2	5,3	10,0	6,4	8,2	8,3
V ^{daf}	[%]	22,75	18,99	22,13	23,46	21,62	17,56	19,48	27,74	32,49	34,09	31,82
RI	[-]	49	56	35	65	58	61	71	82	85	83	80
t ₁	[°C]	424	422	424	410	408	431	432	376	372	365	390
t _{max}	[°C]	458	470	457	458	464	476	472	448	438	434	442
t ₃	[°C]	479	494	477	492	488	498	499	487	476	472	476
F _{max}	[ddpm]	2	6	2	60	11	10	20	1333	20 828	15 182	2001
R	[%]	1,13	1,42	1,29	1,11	1,27	1,31	1,50	1,15	0,97	0,96	0,99
V	[%]	72	82	71	77	77	82	81	84	72	76	84

4. Analiza wyników właściwości węgla i ich klas ziarnowych

W celu określenia wpływu drobnych ziaren na zdolność węgla do generowania ciśnienia rozprężania, z węgla wydzielono 4 klasy ziarnowe: 0,2–0,315 mm; 0,4–0,6 mm, 1,4–1,6 mm oraz 2,5–3,15 mm. Analizowane węgle różniły się przede wszystkim pochodzeniem (Polska, USA, Kanada, Australia), stopniem uwęglenia, zawartością popiołu i właściwościami plastycznymi.

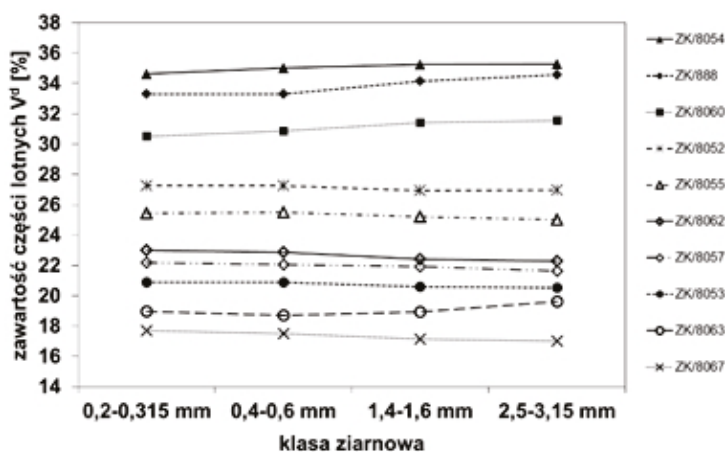
Badane węgle obejmowały cały zakres węgla koksowych, od węgla gazowo-koksowych typu 34 do węgla semikoksowych typu 37 (zgodnie z PN-82/G-97002). Zawartość części lotnych V^d analizowanych węgla wyjściowych obejmowała zakres pomiędzy 16 a 34%, natomiast popiołu $A^d = 5–10\%$ (rys. 2). Badane węgle charakteryzowały się bardzo zróżnicowaną plastycznością według Gieselera, obejmując węgle od prawie nieplastyczniających się ($F_{max} = 2$ ddpm) do węgla niemalże płynących ($F_{max} = 24\ 042$ ddpm).

Na rysunkach 3–6 przedstawiono wybrane właściwości klas ziarnowych badanych węgla.



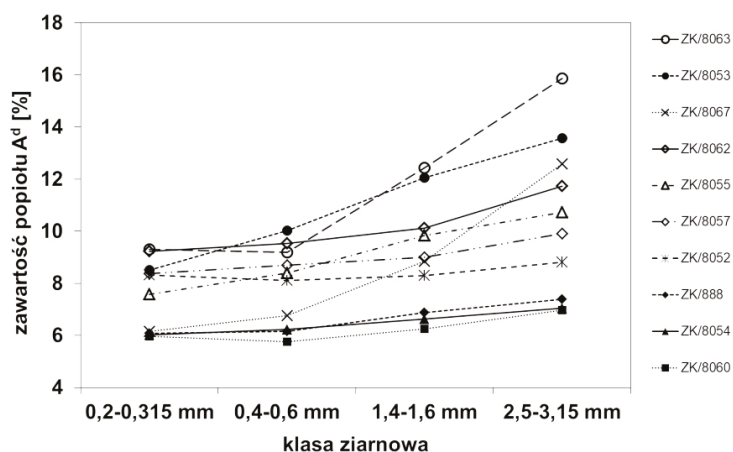
Rys. 2. Zawartość części lotnych V^d i popiołu A^d badanych węgla

Fig. 2. Volatile matter content and ash content of the tested coals



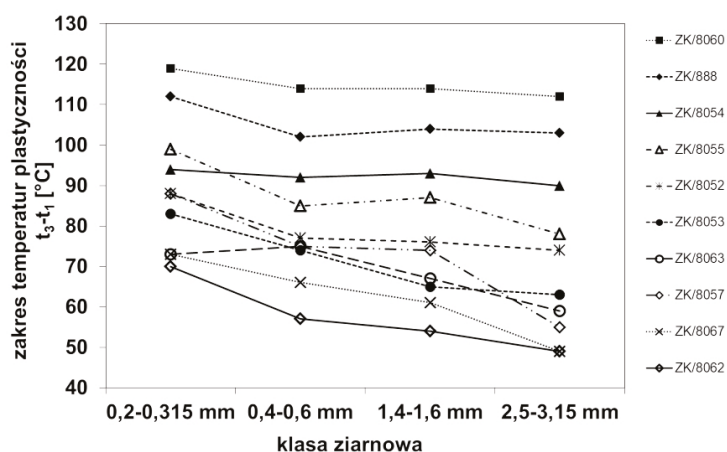
Rys. 3. Zawartość części lotnych V^d w analizowanych klasach ziarnowych wybranych węgla

Fig. 3. Volatile matter content of the selected tested coals grain size fractions



Rys. 4. Zawartość popiołu A^d w analizowanych klasach ziarnowych wybranych węgli

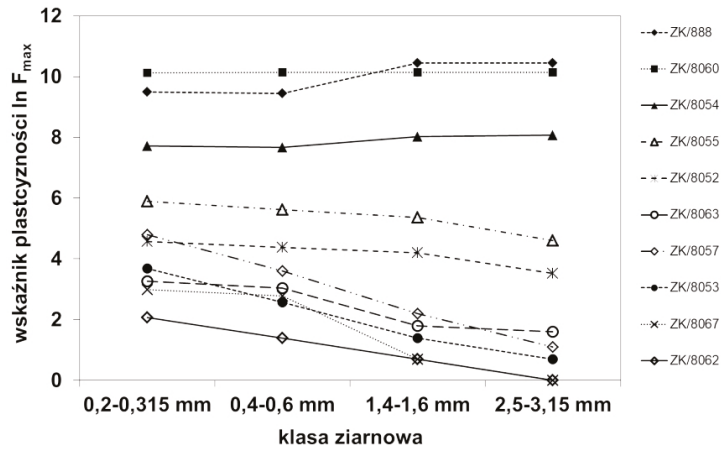
Fig. 4. Ash content of the selected tested coals grain size fractions



Rys. 5. Zakres temperatur plastyczności t_3-t_1 analizowanych klas ziarnowych wybranych węgli

Fig. 5. Plasticity temperature range of the selected tested coals grain size fractions

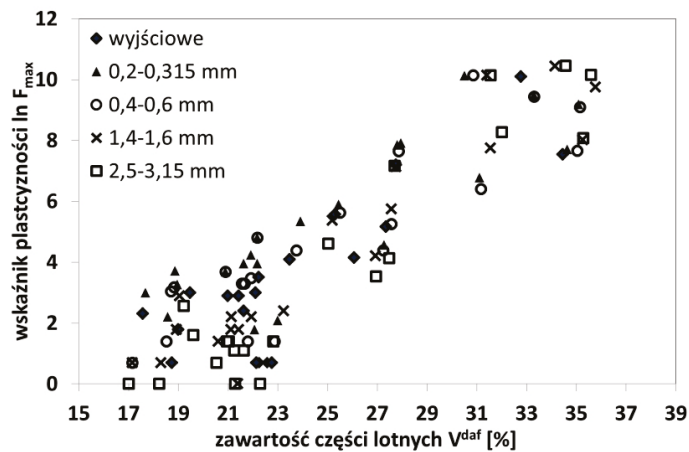
Analizując właściwości wszystkich frakcji ziarnowych, można zauważyć, że w większości przypadków poszczególne klasy ziarnowe każdego z węgli znacząco różniły się między sobą. Zaobserwowano zasadniczy trend: wraz ze wzrostem wielkości ziarna zwiększa się w tej klasie ziarnowej zawartość popiołu, w niewielkim stopniu zmniejszeniu ulega zawartość części lotnych w przeliczeniu na skład suchy, wskaźnik dylatacji b , jak i zakres temperatur plastyczności t_3-t_1 , obniża się.



Rys. 6. Wskaźnik maksimum plastyczności F_{\max} analizowanych klas ziarnowych wybranych węgli

Fig. 6. Fluidity of the selected tested coals grain size fractions

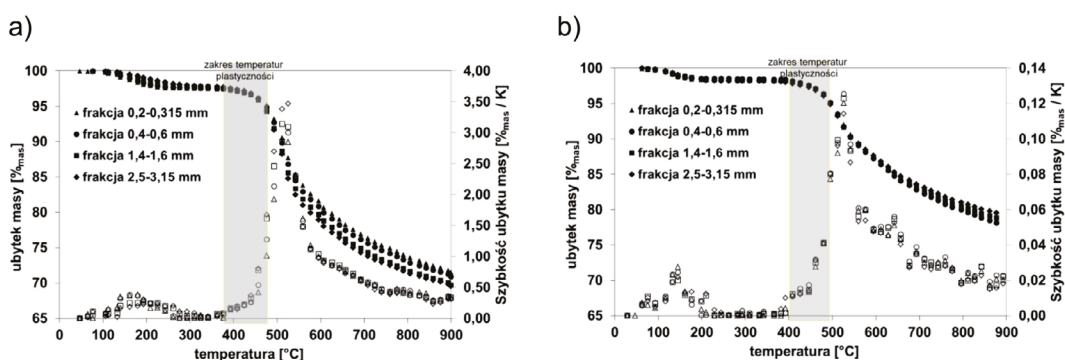
Równocześnie zależność pomiędzy wybranymi parametrami jakościowymi dla wszystkich klas ziarnowych, jak i dla próbek wyjściowych jest zachowana, co można zauważyć przykładowo na podstawie zależności pomiędzy zawartością części lotnych V^{daf} a plastycznością F_{\max} (rys. 7).



Rys. 7. Zależność pomiędzy zawartością części lotnych V^{daf} a logarytmem wskaźnika plastyczności $\ln F_{\max}$ badanych klas ziarnowych węgli i próbek wyjściowych

Fig. 7. Relation between volatile matter content V^{daf} and the fluidity index $\ln F_{\max}$ of the tested coals grain size fractions and initial coals

Analizę termogravimetryczną prowadzono przy szybkości ogrzewania 5 K/min. Przykładowe wykresy zmian masy w trakcie ogrzewania próbek węgla przedstawiono na rysunku 8. Wyniki wskazują, że w zakresie temperatur poniżej temperatury początku plastyczności ($t < t_1$), wydziela się w zależności od węgla jedynie 2–9% całkowitej ilości wydzielających się składników lotnych. Równocześnie w zakresie temperatur pomiędzy początkiem a końcem plastyczności można zauważyć gwałtowny wzrost szybkości ich wydzielania, a sumaryczna ilość wydzielonych w tym okresie składników wynosi około 15% całkowitej ilości wydzielających się składników lotnych.



Rys. 8. Wyniki TG oraz DTG klas ziarnowych

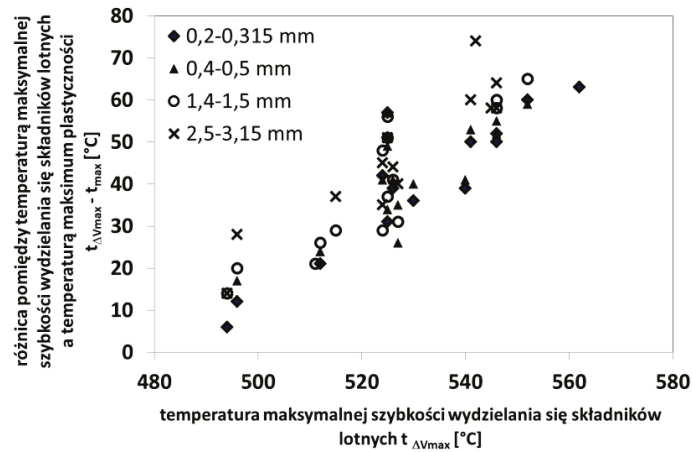
a) węgla 8054, b) węgla 8055

Fig. 8. TG and DTG results of selected grain size fractions

a) coal 8054, b) coal 8055

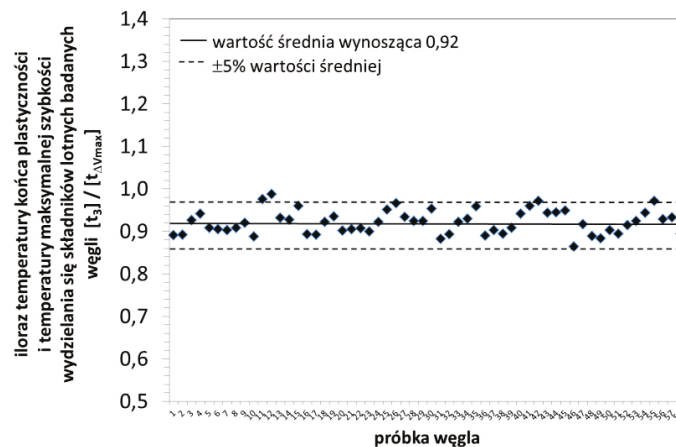
Dla wszystkich badanych węgla i wydzielonych z nich klas ziarnowych temperatura, w której szybkość wydzielania się składników lotnych jest największa występuje powyżej temperatury końca plastyczności. Można zauważyć, że dla węgla z każdej badanej klasy ziarnowej wraz ze wzrostem temperatury, w której występuje najwyższa szybkość wydzielania się składników lotnych t_{DVmax} , wzrasta różnica pomiędzy tą temperaturą a temperaturą maksimum plastyczności t_{max} (rys. 9). Daje to podstawy przypuszczać, że temperatura, przy której uplastyczniony węgiel ulega zestaleniu jest zależna od temperatury, w której występuje maksymalna szybkość wydzielania się składników lotnych a stosunek wartości tych temperatur jest wielkością stałą, co potwierdza rysunek 10. Różnice w wartościach ilorazu $[t_3]/[t_{DVmax}]$ dla prawie wszystkich analizowanych próbek nie różnią się więcej niż o 5% od wartości średniej, wynoszącej 0,92.

W badaniach zmian wielkości ziaren pod wpływem ogrzewania zastosowano wysokotemperaturowy mikroskop firmy Leitz, przystosowując go do pracy w atmosferze gazu inertej – azotu. Z próbki badanego węgla zachowawczo wydzielano cztery klasy ziarnowe: 0,200–0,315 mm, 0,50–0,63 mm, 1,0–1,2 mm oraz 2,50–3,15 mm. Z każdej klasy ziarnowej pobierano losowo 6 ziaren, które następnie poddawano pirolizie. Ziarna umieszczano na



Rys. 9. Różnica pomiędzy temperaturą maksymalnej szybkości wydzielania się składników lotnych t_{DVmax} a temperaturą maksimum plastyczności t_{max} w zależności od t_{DVmax}

Fig. 9. The difference between the temperature of the maximum volatile release rate t_{DVmax} and the temperature of maximum fluidity t_{max} depending on t_{DVmax}



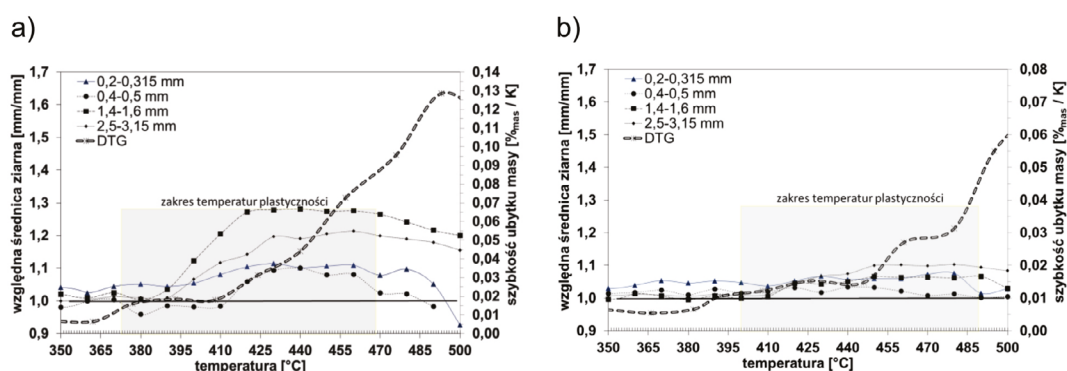
Rys. 10. Iloraz temperatury końca plastyczności t_3 do temperatury, w której występuje maksymalna szybkość wydzielania się składników lotnych badanych węgli t_{DVmax} dla analizowanych próbek węgla

Fig. 10. Temperature of end fluidity and maximum rate of devolatilisation quotient for the analysed coals

ceramicznej podstawce, którą wprowadzano do pieca mikroskopu o temperaturze otoczenia, a następnie uruchamiano dopływ azotu i ogrzewanie pieca. Do temperatury 350°C ziarna nagrzewano z szybkością 10 K/min, natomiast dalsze ogrzewanie do 470°C prowadzono z szybkością 3K/min. Zmianę kształtu i wielkości ziaren rejestrowano fotograficznie, przy czym pierwsze zdjęcie wykonywano przy temperaturze otoczenia, a następne w zakresie

temperatur 370 do 470°C w odstępach co 10°C. Na podstawie zarysów wydymających się ziaren węglowych, utrwalonych na zdjęciach fotograficznych, wyznaczano powierzchnie ich przekroju. Przyjmując upraszczające założenie, że ziarna mają kształt kuli, obliczono względną zmianę ich objętości i średnicy w stosunku do wymiaru ziarna wejściowego (Winicka i in. 2002).

Na rysunku 11a i b porównano zmiany względnej średnicy ziaren wybranych węgla podczas ich ogrzewania oraz wyniki DTG pomiarów termogravimetrycznych poszczególnych klas ziarnowych. Zacienione obszary reprezentują odpowiednie zakresy temperatur plastyczności według Gieselera.



Rys. 11. Zmiany względnej średnicy ziaren frakcji ziarnowych węgla a) 8054 i b) 8055

Fig. 11. Changes of relative coal grain size of coal a) 8054 and b) 8055

W tabeli 2 przedstawiono maksymalne względne średnice (współczynniki pęcznienia θ) klas ziarnowych badanych węgla.

Analizując przedstawione wykresy, można zauważyć, że przyrost objętości ziaren występuje zasadniczo w zakresie temperatur pomiędzy początkiem a maksimum plastyczności. Równocześnie w tym zakresie rozpoczyna się zauważalne wydzielanie się składników lotnych. W okresie uplastycznienia wydzielano się średnio ~15% całkowitej ilości składników lotnych. Przyjmując, że przy szybkości ogrzewania 3 K/min, w czasie około 120 minut koniecznym dla osiągnięcia temperatury początku plastyczności węgla, wydziela się średnio 6% całkowitej ilości części lotnych, to w okresie uplastycznienia, czyli okresie cztery do pięć razy krótszym, wydziela się dwa razy więcej składników lotnych. W takiej sytuacji wewnątrz ziarna gwałtownie wzrasta ciśnienie gazu, a równocześnie ze względu na elastyczną powłokę zewnętrzną ziarno pęcznieje. Dla badanych węgla najmniejszy stopień spęcznienia występował dla ziaren najmniejszych. Wydzielające się składniki lotne mogą w ten sposób zająć większą objętość, ze względu na zdolność do większego uplastycznienia się samego ziarna.

TABELA 2. Współczynniki pęcznienia \varnothing ziaren badanych węgla

TABLE 2. Coking coal properties changes depending on grain size fraction

Nr próbki	Klasa ziarnowa			
	0,2–0,315 mm	0,4–0,6 mm	1,4–1,5 mm	2,5–3,15 mm
8052	1,0428	1,3034	1,3536	1,1122
8053	1,1114	1,0905	1,1866	1,2699
8054	1,1140	1,1005	1,2812	1,2130
8055	1,0759	1,0339	1,0657	1,1028
8056	1,0948	1,1261	1,1550	1,2652
8057	1,0465	1,1120	1,1679	1,1091
8058	0,9885	1,1119	1,0517	1,1243
8059	1,2552	1,1000	1,1341	1,1042
8060	0,9744	1,2404	1,4034	1,8094
8061	1,1202	1,1730	1,1045	1,1578
8062	1,0456	1,1295	1,1858	1,0843
8063	1,1265	1,1886	1,1920	1,2062
8064	1,0496	1,0133	1,0062	1,0929
8065	1,0832	1,1138	1,1903	1,1686
8066	1,3484	1,1322	1,1758	1,0895
8067	1,1108	1,2148	1,1928	1,1115
8068	1,1241	1,1999	1,2751	1,1149
8069	1,2083	1,0795	1,0971	1,2727
888	1,1053	1,3472	1,2781	1,5979
889	1,0827	1,3532	1,3410	1,4848
890	1,0667	1,3175	1,2118	1,4358

Uogólniając, na podstawie uzyskanych wyników, można postawić tezę, że wraz ze wzrastającą średnicą ziarna wzrasta ich współczynnik pęcznienia.

Podsumowanie

Do badań zostało wytypowanych 21 węgla koksowych, różniących się istotnie stopniem uwęglenia ($R = 0,92-1,5$) oraz pochodzeniem (węgle polskie, amerykańskie, kanadyjskie

i australijskie). Na podstawie analizy wyników przeprowadzonych badań eksperymentalnych, można przedstawić następujące wnioski:

- wydzielone klasy ziarnowe różnią się właściwościami, zarówno w odniesieniu do próbki wyjściowej, jak i pomiędzy sobą,
- istniejące zależności pomiędzy właściwościami węgla wyjściowych jak np. zależność pomiędzy zawartością części lotnych a plastycznością, pozostają prawdziwe dla właściwości wydzielonych klas ziarnowych,
- w zakresie temperatur poniżej temperatury początku plastyczności t_1 wydziela się w zależności od węgla jedynie 2–9% całkowitej ilości wydzielających się składników lotnych. Równocześnie w zakresie temperatur pomiędzy początkiem a końcem plastyczności można zauważyć gwałtowny wzrost szybkości ich wydzielania, a sumaryczna ilość wydzielonych w tym okresie składników wynosi około 15% całkowitej ilości wydzielających się składników lotnych,
- temperatura, w której szybkość wydzielania się składników lotnych jest największa, występuje powyżej temperatury końca plastyczności t_3 ,
- istnieje liniowa korelacja pomiędzy temperaturą odpowiadającej maksymalnej plastyczności oraz maksymalną szybkością wydzielania się części lotnych.

Przedstawione rezultaty potwierdzają istotny wpływ wielkości ziaren węglowych na ich właściwości, co w konsekwencji wpływa na jakość produkowanego z nich koksu. Wnioski mogą zostać wykorzystane w zakładach koksowniczych do określenia optymalnego przebiegu węgla do procesu koksowania.

Literatura

- Cebo, W. 2017. Aktualny stan oraz główne kierunki rozwoju przeróbki węgla kamiennego w Polskiej Grupie Górniczej sp. z o.o., *Inżynieria Mineralna* 18, s. 47.
- Dyczko, A. 2018. Górnictwo przyszłości, w stronę JSW 4.0 – inspiracje, wizja, realizacja, prezentacja podczas XXXII Konferencji *Zagadnienia Surowców Energetycznych i Energii w Gospodarce Krajowej*, Zakopane, 14–17 października 2018.
- Eurostat 2019. Imports of solid fossil fuels by partner country, wejście: 29-01-2019.
- Fomin, A.P. i Serga, L.M. 1982. Wybor racjonalnej technologii izmielčeniya uglej dlja koksowanija. *Koks i Chimija* 2, s. 4.
- Gawlik i in. 2013 – Gawlik, L., Grudziński, Z., Kamiński, J., Kaszyński, P., Kryzia, D., Lorenz, U., Mirowski, T., Mokrzycki, E., Olkusi, T., Ozga-Blaschke, U., Pluta, M., Sikora, A., Stala-Szlugaj, K., Suwała, W., Szurlej, A., Wyrwa, A. i Zyśk, J. 2013. *Węgiel dla polskiej energetyki w perspektywie 2050 – analizy scenariuszowe*. Katowice: Wydawnictwo IGSMiE PAN.
- Hochuł, A. 2017. Perspektywy rozwoju Polskiej Grupy Górniczej sp. z o.o., prezentacja podczas II Ogólnopolskiej Konferencji Naukowej *Bezpieczeństwo energetyczne – filary i perspektywa rozwoju*. Rzeszów, 24–25 kwietnia 2017.
- Karcz, A. i Strugała, A. 2001. Ciśnienie rozprężania Cz. IV. Mechanizm powstawania ciśnienia rozprężania, *Karbo* 7–8, s. 265.
- Karcz, A. i Strugała, A. 2008. Zwiększenie szans wykorzystania krajowej bazy węgla koksowych poprzez działania technologiczne w zakresie przygotowania mieszanek węglowych. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management* 24, s. 5.
- Karcz i in. 2002 – Karcz, A., Winnicka, G., Strugała, A., Rozwadowski, A., Kosewska, M., Wróbelka, G., Bębenek, Z. 2002. *Badanie mechanizmu powstawania ciśnienia rozprężania w procesie pirolizy węgla kamiennego, Sprawozdanie końcowe*. Grant KBN Nr. 3 T09C 029 19, Zabrze: IChPW.

- Kosewska, M. i Mertas, B. 2009. Światowy przemysł stalowy w latach 2000–2008, *Karbo* 3, s. 132.
- Kosewska, M. i Wróbelka, K. 2003. Uziarnienie wsadu węglowego a jakość koksu, *Karbo* 3, s. 124.
- Mertas, B. 2014. *Mechanizm powstawania ciśnienia rozprężania w procesie koksowania*. Praca doktorska, Kraków: AGH.
- Nikitin, J.N. 1997. Vlijanije ultratonych ugodnych zierien na spiekajemost' sicity dlja koksowanija. *Koks i Chimija* 4, s. 14.
- Rogała, T. i Hochuł, A. 2017. Strategia rynkowa Polskiej Grupy Górniczej – nowe podejście do spetryfikowanego rynku, prezentacja podczas XXXI Konferencji z cyklu *Zagadnienia surowców energetycznych i energii w gospodarce krajowej*, Zakopane, 15–18.10.2017.
- Rozwadowski, A. 2008. Wpływ uziarnienia i wielkości dodatków inertnych na właściwości plastyczne koksowniczej mieszanki, *Karbo* 2, s. 82.
- Tajc, E.M. 1961. Svojsva kamiennych uglej i process obrazovanija koks. M.: Metałurgizdat, s. 299.

