

ANDRZEJ ROZWADOWSKI\*

## **Ciśnienie koksowania mieszanek węglowych przygotowanych z komponentów wyraźnie różniących się właściwościami reologicznymi masy plastycznej podczas pirolizy**

### Słowa kluczowe

Węgiel kamienny, karbonizacja, ciśnienie koksowania

### Streszczenie

W artykule zostały zaprezentowane wyniki badań ciśnienia generowanego przez próbki wybranych węgla koksowych i sporządzonych z tych węgla mieszanek podczas karbonizacji prowadzonej w warunkach stałej objętości oraz ograniczonej ekspansji. Do badań użyto aparatury, której konstrukcja umożliwia symulowanie zjawisk zachodzących w komorze koksowniczej mających wpływ na poziom ciśnienia powstającego w warstwie plastycznej w dwóch charakterystycznych etapach koksowania. W początkowym stadium koksowania, gdy warstwy plastyczne podążają w kierunku środka komory, a między nimi znajduje się nieuplastyczniony jeszcze węgiel wsadowy (karbonizacja w warunkach ograniczonej ekspansji) oraz w momencie połączenia się warstw plastycznych w osi komory (karbonizacja w stałej objętości).

W czasie badań stwierdzono, że duża płynność masy plastycznej węgla tworzących mieszanek wsadową oraz zbliżony temperaturowy zakres plastyczności sprzyjają powstawaniu wysokiego ciśnienia w warstwie plastycznej podczas koksowania. Jednocześnie w tych warunkach z dużą intensywnością może przebiegać migracja uplastycznionej substancji węglowej poza obszar warstwy plastycznej oraz kompresja nieuplastycznionej części wsadu, a więc zjawiska, które obniżają ciśnienie w warstwie plastycznej. Wprowadzając do składu mieszanki węgiel, generujący wyższe od pozostałych komponentów ciśnienie podczas karbonizacji i uplastyczniający się w tym samym zakresie temperatur co inne składniki mieszanki, należy liczyć się ze wzrostem ciśnienia generowanego przez taki wsad. Natomiast skuteczne obniżenie ciśnienia koksowania można osiągnąć wprowadzając do wsadu węgiel uplastyczniający się w wyraźnie niższych od pozostałych węgla temperaturach, nawet gdy sam charakteryzuje się wysokim ciśnieniem koksowania.

---

\* Dr inż., Wydział Paliw i Energii AGH, Kraków.

Recenzent prof. dr hab. inż. Aleksander Karcz

## Wprowadzenie

Właściwości reologiczne, a konkretnie lepkość uplastycznionego w czasie pirolizy węgla uważane są za jedną z najważniejszych jego cech koksotwórczych. Liczne badania wykazały, że istnieje ścisły związek lepkości ze zdolnością węgla do wydymania się, kinetyką procesu aglomeracji, gazoprzepuszczalnością i ciśnieniem gazów w warstwie plastycznej, a także z wielkością skurczu, strukturą porowatą koksu oraz jego wytrzymałością (Strugała 1999).

Najczęściej stosowaną metodą oceny zachowania się węgla w stanie jego termicznego uplastycznienia jest test Gieselera. W metodzie tej mierzony jest opór jaki odpowiednio rozdrobniona i zagęszczona próbka węgla stawia zanurzonemu w niej mieszadłku obciążonemu stałym momentem obrotowym. W niskiej temperaturze ziarna węglowe całkowicie unieruchamiają mieszadło plastometru. Po przekroczeniu temperatury początku plastyczności mieszadło zaczyna się obracać. W miarę dalszego wzrostu temperatury (szybkość ogrzewania próbki wynosi 3 K/min) zwiększa się płynność węgla, a szybkość obrotów mieszadła wzrasta i osiąga w pewnej temperaturze maksymalną wartość. Dalszy wzrost temperatury i związany z tym proces powstawania półkoksu powoduje stopniowy spadek obrotów mieszadła aż do momentu jego ponownego zatrzymania. Wyniki pomiaru podaje się w °/min lub jednostkach podziałki tarczy na minutę (ddpm). W trakcie testu Gieselera oznacza się następujące wskaźniki charakteryzujące stan plastyczny węgla:

- temperaturę początku plastyczności  $t_1$  [°C],
- temperaturę maksymalnej plastyczności  $t_{\max}$  [°C],
- temperaturę końca plastyczności  $t_3$  [°C],
- wskaźnik maksymalnej plastyczności (płynności)  $F_{\max}$  [°/min lub ddpm],

W czasie oznaczenia wyznacza się także pośrednio zakres plastyczności węgla, tj. różnicę temperatur ( $t_3 - t_1$ ).

Lepkość węgla w stanie termicznego uplastycznienia zależy przede wszystkim od jego stopnia metamorfizmu oraz od czynników technologicznych takich jak: uziarnienie, gęstość nasypowa, zawartość popiołu, temperatura oraz szybkość nagrzewania i nie wykazuje ona cech addytywności (Rusłanowa i in. 1995). Zdecydowana większość węgla będących komponentami koksowniczych mieszanek wsadowych przechodzi przez stan plastyczny. Nie uplastyczniają się bądź słabo się uplastyczniają jedynie komponenty, które uzupełniają skład wsadu węglowego. Są to najczęściej węgle chude, antracytowe lub pył koksowy pochodzący z instalacji suchego chłodzenia bądź odpylania ciągów transportowych koksu. Udział tych składników we wsadzie zależy głównie od potencjału koksotwórczego węgla podstawowych i z reguły nie przekracza kilkunastu procent.

W ostatnich latach obserwuje się wyraźny wzrost wymagań dotyczących jakości produkowanego koksu wielkopieczowego. Dotyczą one nie tylko jego składu chemicznego, zawartości alkaliów, fosforu, chloru, ale także wysokiej wytrzymałości oraz niskiej reaktywności koksu. Aby sprostać tym wymaganiom koksownie zmuszane są do wprowadzania do receptur mieszanek wsadowych coraz większej ilości wysokozmetamorfizowanych węgla

koksowych o bardzo dobrych właściwościach koksotwórczych. Udział tych węgli w mieszance jest jednak ograniczony, gdyż generują one podczas koksowania zbyt wysokie ciśnienie rozprężania, które stwarza realne zagrożenie dla pracujących baterii. Niebezpiecznie wysokie ciśnienie rozprężania objawia się najczęściej utrudnieniami podczas operacji wypychania gotowego koksu z komór (tzw. ciężki bieg pieców), co w istotny sposób skraca żywotności baterii koksowniczych. W ekstremalnych przypadkach zbyt wysokie ciśnienie rozprężania może doprowadzić nawet do zatrzymania pracy baterii (Karcz 2001).

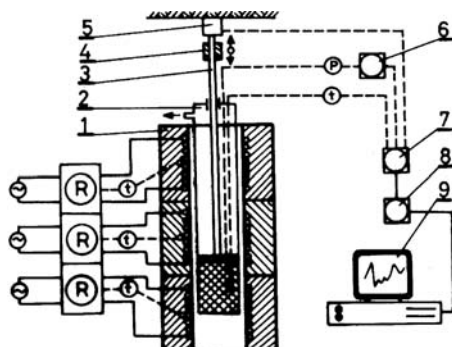
Poziom generowanego ciśnienia rozprężania zależy zarówno od naturalnych właściwości węgla, związanych z jego stopniem metamorfizmu, jak również od warunków technologicznych procesu koksowania. Wysokie ciśnienie rozprężania generują węgle wsadowe o zawartości części lotnych 18–26%. Węgłe te w zakresie temperatur stanu plastycznego charakteryzują się stosunkowo dużą płynnością oraz małym skurczem. Wysoka płynność masy plastycznej tych węgli powoduje, że w warstwie plastycznej wsadu na skutek jej niskiej gazoprzepuszczalności powstaje wysokie ciśnienie koksowania, które za pośrednictwem ulegających skurczowi płyt półkoksu i koksu przekazywane jest na ściany komory koksowniczej. Jednocześnie wytworzone w warstwie plastycznej ciśnienie oddziałuje na zimną, nieuplastycznioną jeszcze część wsadu węglowego powodując jego kompresję. Pod wpływem tego ciśnienia część uplastycznionej substancji węglowej może być również wtłaczana do sąsiadujących z warstwą plastyczną szczelin w półkoksie oraz migrować do nieuplastycznego węgla (Rozwadowski, Strugała 2003).

Tak więc ostateczny nacisk z jakim wsad węglowy oddziałuje na ściany komory (ciśnienie rozprężania) jest wypadkową ciśnienia koksowania generowanego w złożu uplastycznionych ziaren węglowych jakim jest warstwa plastyczna oraz spadku ciśnienia związanego ze zjawiskami, które zachodzą podczas koksowania zarówno w zimnej, jak i gorącej części wsadu.

Celem badań, wyniki których przedstawiono w prezentowanej pracy był pomiar ciśnienia generowanego podczas karbonizacji przez próbki mieszanek węglowych, których składniki różniły się płynnością masy plastycznej oraz zakresem temperatur stanu plastycznego. Wyraźne różnice we właściwościach reologicznych masy plastycznej powstałej podczas pirolizy wybranych do badań węgli wynikały z ich różnego stopnia metamorfizmu.

## 2. Opis aparatury i pomiaru ciśnienia

Karbonizacja mieszanek węglowych składających się z węgli koksowych o różnej plastyczności prowadzona była w aparaturze, której schemat przedstawia rysunek 1. Badana próbka węgla o masie 60 g i wysokości 40 mm posiadająca gęstość nasypową  $750 \text{ kg/m}^3$  umieszczana była w stalowej retorcie i ogrzewana w rurowym piecu elektrycznym. System ogrzewania pieca składał się z trzech oporowych elementów grzewczych, z których każdy posiadał indywidualny układ sterowania mocą. Taka konstrukcja układu grzewczego pozwalała na uzyskanie jednakowej temperatury w tej części pieca, w której znajdowała się



Rys. 1. Stanowisko laboratoryjne do badania ciśnienia rozprężania generowanego przez warstwę uplastycznionych ziaren węgla podczas pirolizy

1 – pionowy piec elektryczny; 2 – retorta; 3 – tłok pomiarowy; 4 – urządzenie umożliwiające płynną regulację położenia tłoka pomiarowego; 5 – czujnik siły; 6, 7, 8 – przetworniki impulsów pomiarowych; 9 – komputer; t – termopara; P – czujnik ciśnienia; R – regulator temperatury

Fig. 1. Laboratory equipment for examination of coking pressure generated by a layer of plasticized coal grains during carbonization

1 – vertical electric oven; 2 – retort; 3 – measuring piston; 4 – equipment for adjustment of measuring piston position; 5 – force sensor; 6, 7, 8 – electric converters of measuring impulses; 9 – computer; t – thermocouple; p – pressure sensor; R – temperature controller

badana próbka węgla. Dzięki temu w czasie pomiaru ciśnienia różnice temperatur wzdłuż wysokości i średnicy próbek nie przekraczały 5 K. Oznacza to, że po osiągnięciu temperatury plastyczności cała próbka znajdowała się w stanie plastycznym i można ją było traktować jako fragment warstwy plastycznej wsadu koksowanego w komorze koksowniczej.

Do pomiaru siły z jaką próbka oddziaływała na tłok pomiarowy w czasie karbonizacji wykorzystano czujnik tensometryczny, który posiadał możliwość płynnej regulacji położenia względem powierzchni badanego węgla. Wygenerowany w czujniku sygnał elektryczny wraz z sygnałem pochodzącym z termopary zanurzonej wewnątrz karbonizowanej próbki przekazywany był do zespołu przetworników, w których sygnały były wzmacniane i konwertowane na sygnały cyfrowe. Z przetworników sygnały kierowane były do komputera, w którym dane pomiarowe ostatecznie archiwizowano.

W czasie pomiaru próbki ogrzewane były z szybkością 3 K/min, a odczyt ciśnienia przekazywanego na tłok podczas karbonizacji odbywał się co 15 sekund.

### 3. Charakterystyka komponentów mieszanek węglowych oraz sposób przygotowania próbek do badań

Do badań użyto trzech węgla koksowych reprezentujących różny stopień metamorfizmu. Węglami tymi były: węgiel gazowo-koksowy typ 34.2 z KWK Anna, węgiel ortokoksowy typ 35.1 z KWK Pniówek oraz węgiel ortokoksowy typ 35.2 z KWK Jas-Mos. Charakterystykę węgla wyjściowych, z których zostały sporządzone mieszanki użyte do badań

obejmującą wyniki analizy technicznej oraz właściwości koksotwórczych, w tym szczególnie istotne z punktu widzenia tematu pracy wyniki oznaczenia wskaźników plastyczności metodą Gieselera przedstawiono w tabelach 1 i 2. Na rysunku 2 natomiast przedstawiono krzywe zmian plastyczności tych węgli podczas pirolizy.

TABELA 1

Wyniki analizy technicznej węgla wyjściowych

TABLE 1

The results of the technical analysis of initial coals

Rodzaj węgla	W <sup>a</sup> [%]	A <sup>a</sup> [%]	V <sup>a</sup> [%]	V <sup>daf</sup> [%]
Anna	0,9	9,9	30,77	34,49
Pniówek	0,6	7,6	26,30	29,12
Jas-Mos	0,3	9,1	20,39	22,14

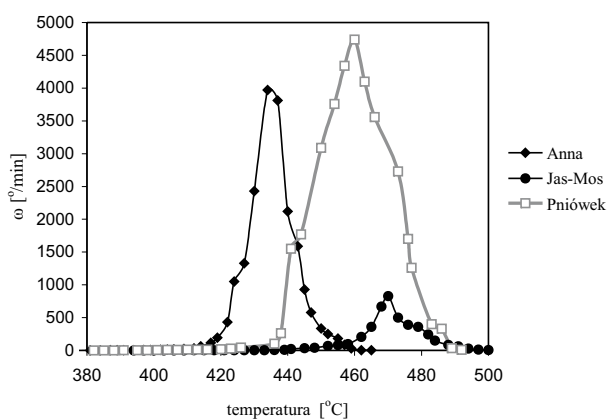
TABELA 2

Właściwości koksotwórcze badanych węgli, komponentów mieszanek węglowych

TABLE 2

The coking properties of coals, components of coal blends under analysis

Rodzaj węgla	SI	Wskaźniki dylatometryczne					Wskaźniki stanu plastycznego			
		a [%]	b [%]	t <sub>I</sub> [°C]	t <sub>II</sub> [°C]	t <sub>III</sub> [°C]	t <sub>1</sub> [°C]	t <sub>max</sub> [°C]	t <sub>3</sub> [°C]	F <sub>max</sub> [°/min]
Anna	6,5	35	0	390	430	450	366	434	465	3 970
Pniówek	7,5	38	+55	390	440	470	382	460	492	4 740
Jas-Mos	5,0	27	+1	410	450	475	394	470	500	830



Rys. 2. Krzywe zmian płynności masy plastycznej badanych węgli w trakcie testu Gieselera

Fig. 2. The change curves of the fluidity of the plastic mass of coals examined during the Gieseler test

Z wybranych węgli koksowych przygotowano próbki o uziarnieniu zbliżonym do składu ziarnowego węgla wsadowego, z którego produkuje się koks w bateriach systemu zasypowego (tab. 3). Stanowiły one materiał wyjściowy do sporządzania mieszanek węglowych których użyto do badań. Recepturę tych mieszanek przedstawia w tabela 4.

Z tak przygotowanych węgli i mieszanek pobierane były próbki o masie 60 g, które po zagęszczeniu do 750 kg/ m<sup>3</sup> poddawano karbonizacji w warunkach stałej objętości (tłok pomiarowy spoczywał bezpośrednio na powierzchni badanego węgla) oraz w warunkach ograniczonej ekspansji. Wówczas między badaną próbką węgla a tłokiem pomiarowym znajdowała się warstwa grafitu o grubości 1 cm oraz uziarnieniu i zagęszczeniu takim samym jak badana próbka. Warstwa ta symulowała w czasie badań nieuplastycznioną część koksowanego wsadu, do której ze złoża uplastycznionych ziaren węglowych jakim jest

TABELA 3

Udział poszczególnych frakcji ziarnowych w węglach, komponentach badanych mieszanek

TABLE 3

The share of particular grain fractions in coals, components of blends under analysis

Frakcja ziarnowa [mm]	Udział frakcji w próbce [%]
poniżej 0,5	45
0,5–1,0	15
1,0–3,15	25
3,15–6,3	15

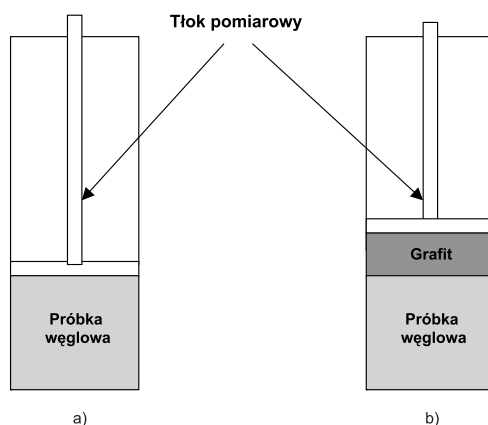
TABELA 4

Skład mieszanek węglowych użytych do badań

TABLE 4

The composition of coal blends used for research

Mieszanka	Skład mieszanki
1	Jas-Mos 80%, Pniówek 20%
2	Jas-Mos 60%, Pniówek 40%
3	Jas-Mos 40%, Pniówek 60%
4	Jas-Mos 80 %, Anna 20%
5	Jas-Mos 60%, Anna 40%
6	Jas-Mos 40%, Anna 60%
7	Jas-Mos 40%, Pniówek 30%, Anna 30%
8	Jas-Mos 40%, Pniówek 10%, Anna 50%
9	Jas-Mos 40%, Pniówek 50%, Anna 10%



Rys. 3. Usytuowanie tłoka pomiarowego siły podczas karbonizacji w stałej objętości (a) oraz w warunkach umożliwiających migrację części uplastycznionej substancji węglowej poza obszar uplastycznionego złoża do złoża grafitu oraz jego kompresję (b)

Fig. 3. The location of the force measuring piston during carbonization in constant volume (a) and under conditions enabling the migration of the plasticized part of the coal substance outside the area of the plasticized deposit to the graphite deposit and its compression (b)

warstwa plastyczna może migrować część uplastycznionej substancji węglowej. Usytuowanie tłoka pomiarowego względem powierzchni karbonizowanych próbek węgla przedstawia rysunek 3.

#### 4. Wyniki pomiarów ciśnienia koksowania i ich analiza

Pomiary ciśnienia generowanego przez badane próbki węgla podczas karbonizacji prowadzone były w dwóch etapach. W pierwszym etapie próbki karbonizowane były w warunkach stałej objętości, w drugim w warunkach ograniczonej ekspansji. Wyniki tych pomiarów, przedstawiające maksymalne wartości ciśnienia zarejestrowane podczas karbonizacji wybranych węgla i mieszanek oraz temperatury w których to ciśnienie wystąpiło, zostały zamieszczone w tabeli 5. Natomiast na rysunkach 4–6 zaprezentowano komputerowe zapisy przebiegu pomiaru ciśnienia w trakcie karbonizacji próbek węgla wyjściowych.

Z zamieszczonych wykresów oraz badań plastyczności węgla metodą Gieselera wynika, że karbonizowane próbki zaczynały generować ciśnienie w temperaturach, w których węgiel znajdował się w stanie plastycznym. Pierwszy symptom ciśnienia pojawiał się jednak nie w chwili osiągnięcia temperatury początku plastyczności  $t_1$ , ale dopiero w temperaturach wyższych, gdy proces uplastycznienia był już znacznie zaawansowany. Natomiast maksymalne wartości ciśnienia próbki węgla Pniówek i Jas-Mos osiągały w temperaturach maksymalnej płynności ( $t_{max}$ ), zaś węgla Anna w temperaturze zbliżonej do temperatury dylatacji ( $t_{III}$ ). Wyższą od  $t_{max}$  temperaturę, w której wystąpiło maksimum ciśnienia podczas

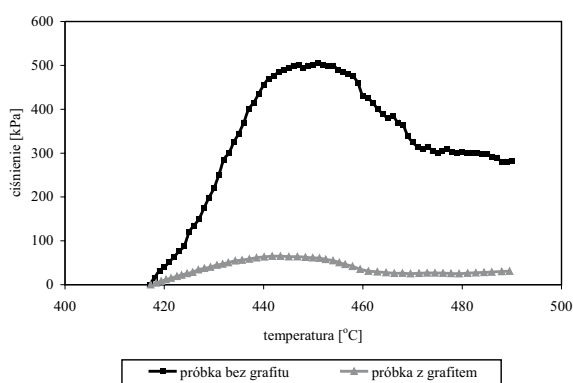
TABELA 5

Maksymalne ciśnienie generowane przez badane węgle i ich mieszanki podczas karbonizacji w stałej objętości oraz w warunkach ograniczonej ekspansji

TABLE 5

Maximum pressure generated by coals and their blends under analysis during the carbonization in constant volume and under the conditions of limited expansion

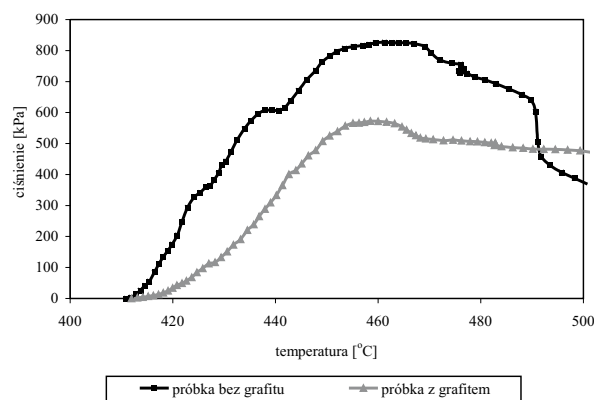
Rodzaj węgla lub mieszanki węglowej	Karbonizacja w stałej objętości		Karbonizacja w warunkach ograniczonej ekspansji	
	maksymalne ciśnienie [kPa]	temperatura w której zarejestrowano maksymalne ciśnienie [°C]	maksymalne ciśnienie [kPa]	temperatura w której zarejestrowano maksymalne ciśnienie [°C]
Anna	505	451	66	442
3418 Pniówek	827	461	572	458
Jas-Mos	362	471	203	474
Jas-Mos 80% Pniówek 20%	415	478	352	474
Jas-Mos 60% Pniówek 40%	526	455	153	471
Jas-Mos 40% Pniówek 60%	534	443	404	462
Jas-Mos 80% Anna 20%	332	463	35	469
Jas-Mos 60% Anna 40%	240	462	11	454
Jas-Mos 40% Anna 60%	209	460	0,9	459
Jas-Mos 40% Pniówek 30% Anna 30%	341	456	71	461
Jas-Mos 40% Pniówek 10% Anna 50%	227	458	16	458
Jas-Mos 40% Pniówek 50% Anna 10%	569	461	293	461



Rys. 4. Ciśnienie generowane przez próbki węgla Anna podczas karbonizacji w stałej objętości oraz w warunkach ograniczonej ekspansji

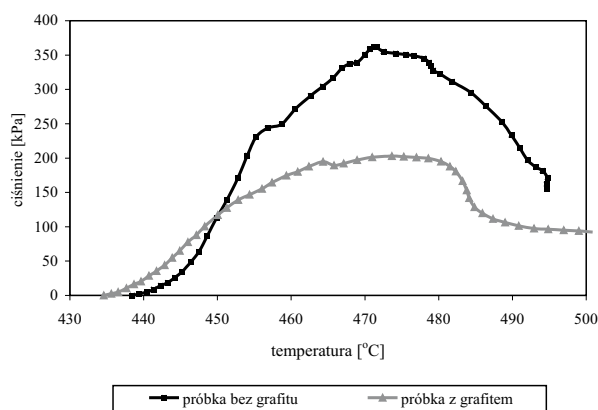
Fig. 4. The pressure generated by the Anna coal samples during carbonization





Rys. 5. Ciśnienie generowane przez próbki węgla Pniówek podczas karbonizacji w stałej objętości oraz w warunkach ograniczonej ekspansji

Fig. 5. The pressure generated by the Pniówek coal samples during carbonization in constant volume and under the conditions of limited expansion



Rys. 6. Ciśnienie generowane przez próbki węgla Jas-Mos podczas karbonizacji w stałej objętości oraz w warunkach ograniczonej ekspansji

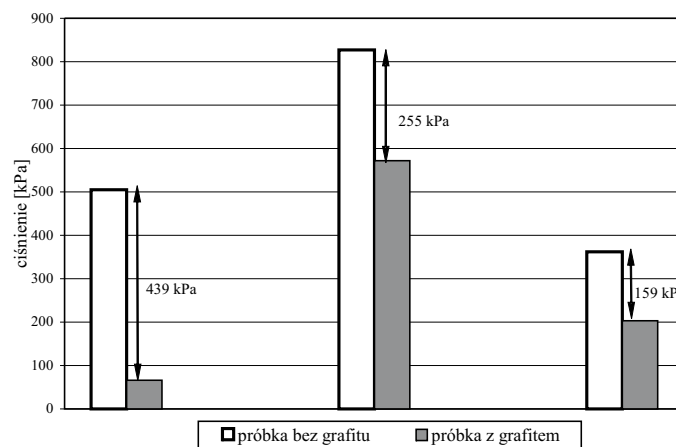
Fig. 6. The pressure generated by the Jas-Mos coal samples during carbonization in constant volume and under the conditions of limited expansion

karbonizacji węgla Anna można tłumaczyć niską jeszcze, w temperaturze  $t_{\max}$  ( $434^{\circ}\text{C}$ ), intensywnością wydzielania się lotnych produktów pirolizy. Dynamika wydzielania się tych produktów podczas pirolizy węgla typu 34.2 wyraźnie wzrasta dopiero w temperaturze około  $450^{\circ}\text{C}$  (Karcz, Rozwadowski 2002). Po przekroczeniu temperatury dylatacji następował spadek ciśnienia generowanego przez badane próbki.

Z przebiegu krzywych zmian ciśnienia węgla wyjściowych (rys. 4–6) oraz danych zawartych w tabeli 5 wynika, że próbki węgla Pniówek wyróżniającego się spośród badanych węgla największą plastycznością, dylatacją oraz spiekalnością wykazały największą zdolność do generowania ciśnienia podczas karbonizacji prowadzonej zarówno w wa-

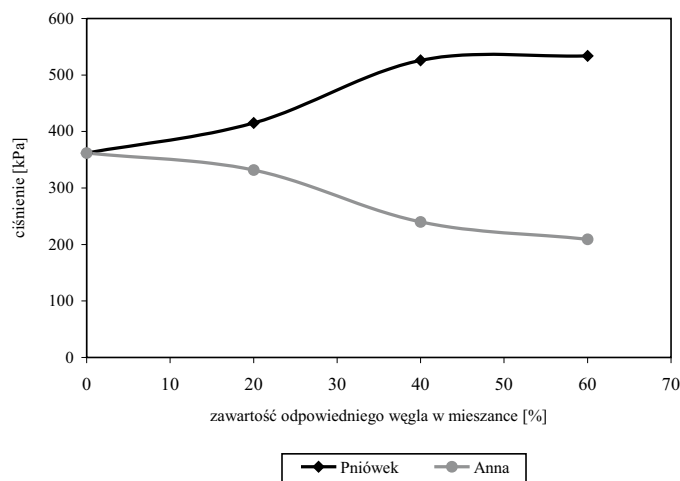
runkach stałej objętości, jak i ograniczonej ekspansji. Próbki pozostałych węgla wyjściowych generowały ciśnienie na wyraźnie niższym poziomie, przy czym podczas karbonizacji w stałej objętości węgiel Anna charakteryzujący się podobną jak węgiel Jas-Mos dylatacją, wykazał ciśnienie o 143 kPa wyższe. Natomiast ten sam węgiel podczas karbonizacji w warunkach umożliwiających migrację uplastycznionej substancji węglowej do złoża grafitu i kompresję tego złoża wytworzył ciśnienie wynoszące jedynie 66 kPa. Tym samym spadek ciśnienia, który nastąpił w wyniku kompresji warstwy grafitu i migracji do jej wnętrza części uplastycznionej substancji węglowej w przypadku najniżej uwęglonego węgla Anna był największy spośród wszystkich badanych węgla wyjściowych. Potwierdzają to wykresy zamieszczone na rysunku 7, na których podano różnice między maksymalnymi wartościami ciśnienia zarejestrowanymi podczas karbonizacji w warunkach stałej objętości oraz ograniczonej ekspansji. Porównując przebiegi krzywych ciśnień zarejestrowane podczas karbonizacji węgla wyjściowych w warunkach stałej objętości oraz ograniczonej ekspansji (rys. 4–6) należy zauważyć, że największe różnice między tymi ciśnieniami wystąpiły w temperaturach zbliżonych do temperatur, w których próbki karbonizowane w stałej objętości generowały maksymalne wartości ciśnienia. Można zatem sądzić, że w przypadku węgla wyjściowych w tych właśnie temperaturach najintensywniej przebiegały zjawiska migracji uplastycznionej substancji węglowej do warstwy grafitu oraz kompresji tej warstwy pod wpływem ciśnienia powstałego w złożu węglowym.

Z komputerowych zapisów przebiegu zmian ciśnienia generowanego przez próbki mieszanek dwuskładnikowych węgla Jas-Mos i Pniówek w czasie karbonizacji prowadzonej w warunkach stałej objętości i sporządzonego na ich podstawie wykresu (rys. 8) wynika, że wzrost dodatku węgla Pniówek do bazowego węgla Jas-Mos powodował wyraźny wzrost



Rys. 7. Maksymalne ciśnienie generowane podczas karbonizacji węgla wyjściowych w stałej objętości oraz w warunkach ograniczonej ekspansji

Fig. 7. Maximum pressure generated during the carbonization of initial coals in constant volume and under the conditions of limited expansion



Rys. 8. Wpływ dodatku węgla Pniówek i Anna na wielkość maksymalnego ciśnienia generowanego podczas karbonizacji w stałej objętości przez próbki mieszanek dwuskładnikowych sporządzonych na bazie węgla Jas-Mos

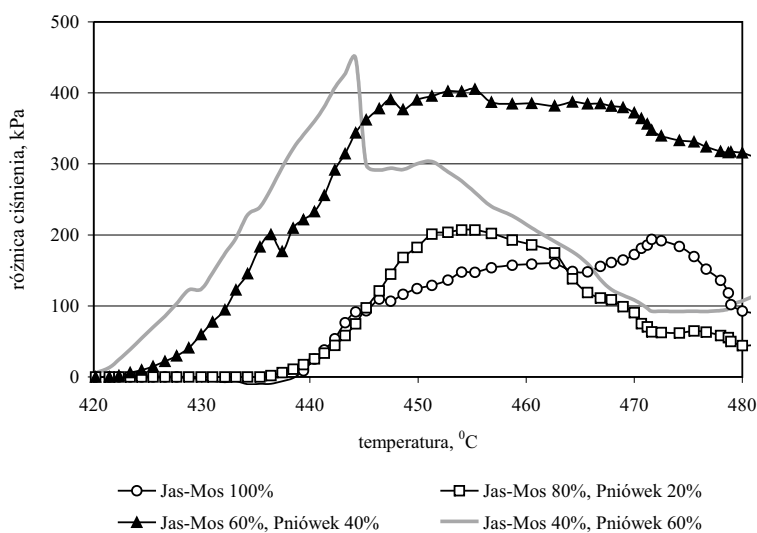
Fig. 8. The influence of adding Pniówek and Anna coal on the level of maximum pressure generated during carbonization in constant volume by blend samples prepared on the basis of Jas-Mos coal

ciśnienia podczas karbonizacji tych mieszanek. Analiza właściwości reologicznych tych węgla podczas pirolizy w plastomerze Gieselera wykazała również, że w chwili gdy węgiel Jas-Mos znajdował się w stadium swojej maksymalnej plastyczności masa plastyczna węgla Pniówek charakteryzowała się jeszcze bardzo dużą płynnością. W wyniku wzajemnego oddziaływania umiarkowanie plastycznej substancji węglowej węgla Jas-Mos z kilkakrotnie bardziej płynną masą węgla Pniówek (zakresy plastyczności tych węgla pokrywają się) wzrósł prawdopodobnie opór jaki wydzielającym się gazom pirolitycznym stawia uplastycznione złożo węglowe, co w konsekwencji doprowadziło do znacznego wzrostu ciśnienia przekazywanego na tłok pomiarowy.

Na podstawie zmian ciśnienia zarejestrowanego podczas karbonizacji próbek mieszanek dwuskładnikowych węgla Jas-Mos i Anna można stwierdzić, że rosnący udział węgla Anna w mieszance powodował systematyczny spadek ciśnienia generowanego podczas karbonizacji prowadzonej zarówno w stałej objętości, jak i w warunkach ograniczonej ekspansji. Ciśnienie wytworzone podczas karbonizacji tych węgla było niższe od ciśnienia węgla Jas-Mos (rys. 8) pomimo, że „czysty” węgiel Anna w stałej objętości generował ciśnienie na wyraźnie wyższym niż Jas-Mos poziomie. Spadek ciśnienia po dodaniu węgla Anna można prawdopodobnie tłumaczyć wzrostem gazoprzepuszczalności uplastycznionego złoża, wynikającym ze znacznych różnic w zakresach plastyczności węgla składowych. Z krzywych zmian plastyczności węgla wyjściowych zamieszczonych na rysunku 2 wynika bowiem, że w zakresie temperatur plastyczności węgla Jas-Mos masa plastyczna węgla Anna była już w stadium resolidacji.

Z danych uzyskanych podczas pomiarów wynika również, że wielkość dodatku węgla Pniówek i Anna do bazowego węgla Jas-Mos w różny sposób wpływała na temperaturę, w której rejestrowano maksymalne ciśnienie podczas karbonizacji. Wzrost udziału węgla Pniówek w mieszance powodował obniżenie tej temperatury. Natomiast podczas karbonizacji mieszanek z udziałem węgla Anna temperatura w której notowano maksymalne ciśnienie koksowania pozostawała praktycznie na tym samym poziomie i była nieznacznie niższa do temperatury obserwowanej podczas karbonizacji „czystego” węgla Jas-Mos.

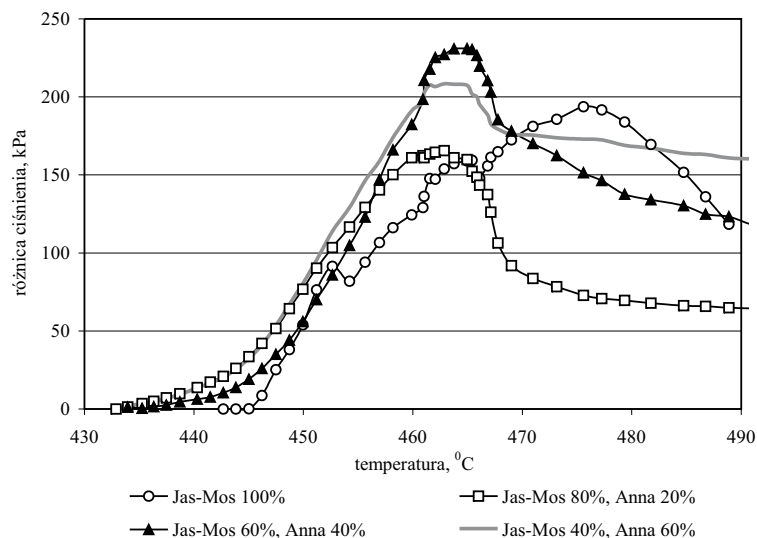
Z przeprowadzonych badań wynika, że rosnący udział węgla Pniówek w mieszance z węglem Jas-Mos miał wpływ na intensywność zjawisk migracji uplastycznionej substancji węglowej do wnętrza warstwy grafitu i kompresji tej warstwy po wpływie ciśnienia wytworzonego w uplastycznionym złożu węglowym oraz na temperaturę, w której obserwowano maksymalną intensywność powyższych zjawisk. Rosnący udział węgla Pniówek intensyfikował zjawiska migracji i kompresji, na co wyraźnie wskazuje wzrost różnicy pomiędzy ciśnieniem wytworzonym w czasie karbonizacji w stałej objętości i generowanym w warunkach ograniczonej ekspansji (rys. 9). Zwiększenie dodatku tego węgla powodowało również systematyczny spadek temperatury, w której obserwowano maksymalną intensywność tych zjawisk.



Rys. 9. Różnice między ciśnieniem generowanym przez próbki mieszanek węgla Jas-Mos i Pniówek podczas ich karbonizacji w stałej objętości i w warunkach ograniczonej ekspansji

Fig. 9. The differences between the pressure generated by Jas-Mos and Pniówek samples of coal blends during the carbonization in constant volume and under the conditions of limited expansion

Podczas karbonizacji mieszanek węgla Anna z węglem Jas-Mos, zwiększenie udziału węgla Anna w mieszance nie wywołało tak znacznego, jak to miało miejsce w przypadku węgla Pniówek, wpływu na intensywność migracji uplastycznionego węgla do warstwy grafitu i stopień kompresji tej warstwy. Z rysunku 10 wynika, że wzrost udziału węgla Anna



Rys. 10. Różnice między ciśnieniem generowanym przez próbki mieszanek węgla Jas-Mos i Anna podczas karbonizacji w stałej objętości i w warunkach ograniczonej ekspansji

Fig. 10. The differences between the pressure generated by Jas-Mos and Anna samples of coal blends during the carbonization in constant volume and under the conditions of limited expansion

nie różnicuje także temperatury w której zjawiska te występują najintensywniej. Temperatura ta była zbliżona dla wszystkich mieszanek i wynosiła około 460°C.

Na podstawie wyników pomiarów maksymalnego ciśnienia wytworzonego podczas karbonizacji przez próbki mieszanek trójskładnikowych (tab. 5) można stwierdzić, że wartość maksymalnego ciśnienia generowanego przez mieszanekę zawierającą 40% węgla Jas-Mos oraz 30% węgla Anna i 30% węgla Pniówek zbliżona była do wartości maksymalnego ciśnienia wytworzonego przez „czysty” węgiel Jas-Mos. Oznacza to, że dodatek węgla Anna zrównoważył wzrost ciśnienia jaki wywołał dodatek węgla Pniówek do węgla Jas-Mos w czasie karbonizacji tych węgli. Podczas badań pozostałych mieszanek trójskładnikowych obserwowano spadek bądź wzrost maksymalnego ciśnienia, który zależał od tego czy w mieszance przeważał węgiel Anna czy Pniówek.

### Podsumowanie

Punktem wyjścia do interpretacji przedstawionych w publikacji wyników badań jest spostrzeżenie, że uplastyczniające się w retorcie złożo węglowe symuluje zachowanie warstwy plastycznej w czasie koksowania w komorze koksowniczej. Przy takim założeniu, uplastyczniona podczas karbonizacji w stałej objętości próbka węgla odzwierciedla połączone ze sobą w osi szwu smołowego warstwy plastyczne, a ciśnienie mierzone w tych

warunkach charakteryzuje potencjalną zdolność wsadu węglowego do generowania ciśnienia w obrębie warstwy plastycznej. Jest to zdolność potencjalna, gdyż pomiar nie uwzględnia wpływu zjawiska skurczu półkoku i koksu, które wpływa na poziom ciśnienia panującego w warstwie plastycznej. Natomiast wyniki uzyskane podczas karbonizacji próbki w warunkach ograniczonej ekspansji pozwalają wnioskować o wielkości ciśnienia panującego w warstwie plastycznej gdy możliwa jest kompresja nieuplastycznionego wsadu oraz migracja do niego części uplastycznionej substancji węglowej. Wyniki te odnoszą się do początkowego stadium koksowania, kiedy warstwy plastyczne przemieszczają się od ścian grzewczych komory w kierunku jej osi, a między nimi znajduje się naturalny bufor w postaci nieuplastycznionej mieszanki zapobiegający nadmiernemu wzrostowi ciśnienia rozprężania w komorze.

Mając na względzie powyższe założenia, na podstawie wyników przeprowadzonych pomiarów można dla badanych węgla sformułować następujące wnioski dotyczące ciśnienia generowanego w warstwie plastycznej podczas koksowania.

1. Właściwości koksotwórcze węgla wsadowych, a szczególnie właściwości reologiczne ich masy plastycznej podczas pirolizy, mają istotny wpływ na poziom ciśnienia powstającego w warstwie plastycznej, które charakteryzuje potencjalną zdolność wsadu do generowania ciśnienia rozprężania. Warunkami sprzyjającymi powstawaniu wysokiego ciśnienia w warstwie plastycznej jest duża płynność uplastycznionego termicznie węgla oraz intensywne wydzielanie się lotnych produktów pirolizy.
2. W przypadku niskouwęglonych węgla koksowych charakteryzujących się dużą płynnością masy plastycznej, generujących jednocześnie odpowiednio wysokie ciśnienie koksowania, efekt w postaci obniżenia ciśnienia w warstwie plastycznej na skutek migracji uplastycznionej substancji węglowej do nieuplastycznionego wsadu i jego kompresji jest zdecydowanie większy niż w przypadku węgla koksowych o wysokim stopniu metamorfizmu.
3. Wysokie ciśnienie jakie powstaje w czasie pirolizy węgla, komponentów koksowniczej mieszanki wsadowej, nie musi oznaczać, że ciśnienie generowane przez warstwę plastyczną takiej mieszanki będzie równie wysokie. Oprócz ciśnienia koksowania węgla składowych równie istotne znaczenie w tym względzie mają ich temperaturowe zakresy plastyczności.

W podsumowaniu należy zaznaczyć, że powyższe wnioski dotyczą wsadów węglowych, które są koksowane w komorach napełnianych grawitacyjnie, tj. posiadają uziarnienie i zagęszczenie charakterystyczne dla systemu zasypowego.

## LITERATURA

- Rusłanowa I.D. i in., 1995 – Wzaimodziejstwo uglej pri pirolizje. Koks i Chimija 12, s. 3.
- Strugała A., 1999 – Ocena reologicznych właściwości węgla w stanie termicznego uplastycznienia. Karbo 11, s. 380.
- Karcz A., 2001 – Ciśnienie rozprężania, Cz. III. Oddziaływanie ciśnienia rozprężania na ściany komór koksowniczych. Karbo 7–8, s.261.
- Karcz A., Rozwadowski A., 2002 – Badanie pirolizy mieszanek węgla kamiennego gazowo-koksowego i miękkiego węgla brunatnego. Karbo 6, s. 171.
- Rozwadowski A., Strugała A., 2003 – Wpływ migracji uplastycznionej substancji węglowej poza obszar warstwy plastycznej na wielkość generowanego ciśnienia rozprężania. Karbo 2, s. 85.

ANDRZEJ ROZWADOWSKI

**THE COKING PRESSURE OF COAL BLENDS PREPARED FROM COMPONENTS DIFFERING MARKEDLY  
IN THE REOLOGICAL PROPERTIES OF THE PLASTIC MASS DURING PYROLYSIS**

Key words

Coal, carbonization, coking pressure

Abstract

The article presents the results of a research into the pressure generated by samples of selected bituminous coals and blends made from these coals during carbonization carried out under the conditions of constant volume and limited expansion. The structure of the apparatus used in research enables the simulation of the effects occurring in the coking chamber affecting the level of pressure generated in the plastic layer in two characteristic coking stages. In the early phase of coking, when plastic layers head for the middle part of the chamber and there is unplasticized coal charge between them (carbonization under the conditions of limited expansion) and at the moment of plastic layers combining in the chamber's axis (carbonization in constant volume).

During research it was found that considerable fluidity of the plastic coal mass forming the charge blend and similar temperature range of plasticity facilitate the generation of high pressure in the plastic layer during coking. Simultaneously, under these conditions high intensity may characterize the migration of the plasticized coal substance outside the area of the plastic layer as well as the compression of the unplasticized part of the charge, that is the effects which relatively lower the pressure in the plastic layer. Adding to the composition of the blend coal generating higher pressure during carbonization than other components and plasticizing within the same temperature range as other ingredients of the blend, we have to take into account the rise of the pressure generated by such a charge. Whereas effective reduction of the coking pressure may be attained by adding to the charge coal plasticizing in significantly lower temperatures than other coals even if it is characterized by high coking pressure.