

Leokadia Róg

CZYNNIKI WPLYWAJĄCE NA PODATNOŚĆ PRZEMIAŁOWĄ WĘGLI KAMIENNYCH

Streszczenie

Jakość węgla i ich przydatność technologiczną określa się bardzo często, wykorzystując jedynie ich podstawowe właściwości. Najczęściej jest to zawartość popiołu, wilgoci, siarki całkowitej oraz wartość opałowa. W przypadku stosowania węgla w konkretnych technologiach niejednokrotnie ważne są inne parametry charakteryzujące jego jakość. Do takich parametrów zaliczyć można między innymi podatność przemiałową węgla, którą oznacza się najczęściej metodą Hardgrove'a. Parametr ten jest ważny zarówno przy doborze paliwa do procesu spalania, jak i do procesu koksowania.

W badaniach, których wyniki przedstawiono w niniejszym artykule, podjęto próbę określenia czynników wpływających na podatność przemiałową węgla, wynikających z jego budowy chemicznej i petrograficznej.

Badania wykonano na 27 próbkach węgla sortymentowych, pochodzących z 16 kopalń Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. Były to sortymenty grube i średnie, wykazujące mniejszą zawartość popiołu niż miały z tej samej kopalni. Wybrano węgle o zawartości popiołu poniżej 10%. Pozwoliło to na zminimalizowanie wpływu zawartości popiołu na wartość wskaźnika podatności przemiałowej i lepsze wyeksponowanie wpływu innych czynników jakościowych.

Wytypowane do badań węgle, charakteryzowały się zróżnicowanymi wartościami wskaźnika podatności przemiałowej HGI. Wartości ich zmieniały się w granicach od 37 do 66. Podstawowymi składnikami w budowie badanych węgla kamiennych były macerały grupy wityrynytu. Ich zawartość zmieniała się od 47 do 75% obj., natomiast zawartość drugiej pod względem ilości grupy macerałów – inertynytu, zmieniała się od 15 do 54% obj.

W miarę wzrostu zawartości wityrynytu zwiększała się podatność przemiałowa węgla. Współczynnik korelacji dla tej zależności wynosił 0,83. Zależność ta nie dotyczyła właściwości węgla, w budowie petrograficznej których przeważały macerały grupy wityrynytu, a zawartość popiołu, na tle pozostałych węgla wytypowanych do badań, była duża i mieściła się w granicach 8–10%. Charakteryzowały się one małą podatnością przemiałową ($HGI < 41$). W popiołach z tych węgla stwierdzono zwiększoną zawartość SiO_2 – powyżej 32% (zakres dla wszystkich badanych węgla 10,9–45,4%) i Al_2O_3 – powyżej 24% (zakres dla wszystkich badanych węgla 9,6–31,8%) oraz małą zawartość Fe_2O_3 – poniżej 14,9% (zakres dla wszystkich badanych węgla – 6,2–20,8%), CaO – poniżej 10,5% (przy zakresie 5,2–21,7% dla wszystkich badanych węgla) i MgO – poniżej 5,2% (przy zakresie 2,7–12,5% dla wszystkich badanych węgla). Substancja mineralna występowała w tych węglach bardzo często w postaci siarczków i substancji ilastej, tworzących wtrącenia i przesylenia w kaolinicie, który jest jednym z macerałów grupy wityrynytu, co może być przyczyną zmniejszenia podatności przemiałowej tych węgla.

W węglach o dużej zawartości macerałów grupy inertynytu w porównaniu z węglami, w budowie których przeważały macerały grupy wityrynytu, stwierdzono znacznie mniej popiołu oraz nieco większy wskaźnik HGI. W składzie chemicznym popiołu z tych węgla obserwowano mniej SiO_2 i Al_2O_3 , oraz więcej Fe_2O_3 , CaO i MgO. Z badań mikroskopowych wynika, że przeważającymi ilościowo formami występowania inertynytu, były fuzynity i semifuzynity pustokomórkowe, które sprzyjają wzrostowi podatności przemiałowej.

Generalnie, można stwierdzić, że podatność przemiałowa zwiększała się w miarę wzrostu zawartości SiO_2 , Al_2O_3 oraz w miarę zmniejszania się zawartości CaO i MgO w popiele. Współczynniki korelacji dla tych zależności były duże i wynosiły odpowiednio: 0,87; 0,89; 0,91 i 0,92.

Factors influencing the grindability of hard coals

Abstract

The quality of coals and their technological usefulness are very often determined using only their basic properties. Most frequently those are the content of ash, moisture, total sulphur, as well as the calorific value. In the case of coal use in real technologies more than once important are other parameters characterising coal quality. Among such parameters we can count among others coal grindability, which most frequently is determined using the Hardgrove's method. This parameter is important both in the case of fuel selection for the combustion process and coking process.

During investigations, the results of which have been presented in the article, a trial was undertaken to define factors influencing coal grindability, resulting from the chemical and petrographic structure of coal.

The investigations were carried out using 27 samples of graded coal from 16 mines located in the Upper Silesian Coal Basin. Those were thick and medium coal size grades with lower ash content than fines from the same mine. Coals with ash content below 10% were selected. This option allowed to minimise the impact of ash content on the value of the grindability index and to emphasise better the influence of other quality factors.

The coals selected to conduct tests were characterised by differentiated values of the grindability index HGI. Their values changed within the range between 37 and 66. The basic components in the structure of tested hard coals constituted macerals of the vitrinite group. Their content changed from 45 to 75% by volume, while the content of the second, as regards the quantity, maceral group – inertinite, changed from 15 to 54% by volume.

Along with the growth of vitrinite content increased the grindability of coals. The correlation coefficient for this relationship amounted to 0.83. This relationship has not concerned the properties of coals, in the petrographic structure of which prevailed macerals of the vitrinite group, and the ash content, against the background of remaining coals selected for tests was high and ranged between 8 and 10%. They were characterised by low grindability ($HGI < 41$). In ashes of these coals increased SiO_2 content was ascertained – more than 32% (the range for all tested coals – between 10.9 and 45.4%), and Al_2O_3 – more than 24% (the range for all tested coals – between 9.6 and 31.8%), as well as low content of Fe_2O_3 – below 14.9% (the range for all tested coals – between 6.2 and 20.8%), CaO, below 10.5% (the range for all tested coals – between 5.2 and 21.7%) and MgO content – below 5.2% (the range for all tested coals 2.7–12.5%). The mineral substance occurred in these coals very frequently in the form of sulfides and silty substance, creating inclusions and supersaturations in kaolinite, which is one of the macerals of the vitrinite group, what can be the reason of grindability decrease of these coals.

In coals with high content of macerals of the inertinite group in comparison with coals, in the structure of which prevailed macerals of the vitrinite group, considerably less ash and a little higher HGI index were ascertained. In the chemical composition of ash of these coals less SiO_2 and Al_2O_3 as well as more Fe_2O_3 , CaO and MgO contents have been observed. From microscopic tests results the fact that the quantitatively prevailing forms of inertinite occurrence were fusinites or hollow-cell semifusinites, which favour the grindability growth.

Generally we can state that the grindability increased along with the growth of the SiO_2 and Al_2O_3 content and according to the decrease of the CaO and MgO content in the ash. The correlation coefficients for these relationship were high and amounted to: 0.87, 0.89, 0.91, and 0.92, respectively.

WPROWADZENIE

Węgiel kamienny utrzymuje cały czas swoją wysoką pozycję zarówno jako paliwo energetyczne, jak i surowiec do produkcji koksu. Liczne prognozy opracowywane przez krajowe i międzynarodowe instytucje wskazują, że zapotrzebowanie na ten surowiec będzie się nadal utrzymywać. W związku z powyższym badania nad parametrami jakościowymi węgla, mającymi wpływ na przebieg procesów technologicznych, powinny być prowadzone nadal.

Jakość węgla i ich przydatność technologiczną określa się bardzo często wykorzystując jedynie ich podstawowe właściwości. Najczęściej jest to zawartość popiołu, wilgoci, siarki całkowitej oraz wartość opałowa. W przypadku stosowania węgla w konkretnych technologiach niejednokrotnie ważne są inne parametry charakteryzujące jego jakość. Do takich parametrów zaliczyć można między innymi podatność przemiałową węgla, którą oznacza się najczęściej metodą Hardgrove'a. Parametr ten jest ważny zarówno przy doborze paliwa do procesu spalania, jak i do procesu koksovania.

Mała podatność na mielenie i kruszenie jest cechą pożądaną podczas transportu i przeladunku węgla, aby uniknąć zbytniego rozkruszania. Jest to istotne np. w sytuacji, gdy węgiel jest przeznaczony do stosowania w kotłach rusztowych w energetyce. Inne wymagania dotyczą stosowania węgla w kotłach pyłowych i w koksowniach. W tym przypadku korzystna jest dobra zdolność do przemiału, ponieważ rozdrabnianie, ze względu na zużycie energii i kosztów naprawy zużywających się części w młynach, jest ważnym czynnikiem ekonomicznym.

Zagadnienie kruszalności węgla było poruszane w literaturze wielokrotnie. Zajmowali się nim między innymi: M. Stefański (1970), T. Laskowski (1932, 1948), W. Świątosławski, B. Roga, M. Chorąży (1932), J. Winnicki, K. Olszewska, C. Magnes (1960), G. Gruson (1957), R. Chamberlain, N.C. Lockhart, M. Smyth (1994).

W badaniach, których wyniki przedstawiono w niniejszym artykule, podjęto próbę określenia czynników wpływających na podatność przemiałową węgla, wynikających z jego budowy chemicznej i petrograficznej.

1. MECHANIZM PROCESU KRUSZENIA SIĘ WĘGLA

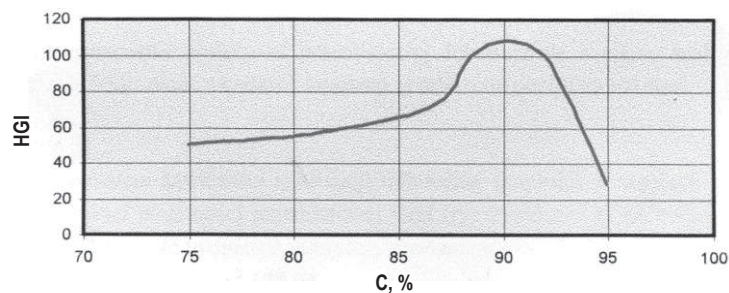
Rozdrabnianiem nazywa się proces polegający na mechanicznym zmniejszaniu wielkości ziaren. Kruszenie się węgla może być procesem niezamierzonym, występującym podczas urabiania węgla, jego transportu i przeróbki. Uważa się, że podatność węgla na kruszenie należy tłumaczyć jego szczelinowatością, budową petrograficzną i niejednorodnością struktury. W ziarnach węglowych istnieją szczeliny i powierzchnie osłabienia, zmieniające lokalnie wytrzymałość mechaniczną. Szczelinowatość występująca w węglu może być zarówno natury endogenicznej, związana z procesami genezy węgla, jak i egzogenicznej, wynikająca z procesów tektonicznych i eksploatacyjnych. Istotny wpływ na mechaniczne własności węgla może mieć również mikroszczelinowatość endogeniczna i istniejące wewnątrz ziaren strefy kruchości lub nieciągłości (Czapliński 1994).

Węgiel kruszy się podczas przeróbki mechanicznej i transportu wskutek różnych działań mechanicznych, jak uderzenie, ścieranie, zgniatanie i ścinanie. Wszystkie te działania mogą występować równocześnie, lecz ich wpływ na przebieg kruszenia jest różny. Dominujące działanie, na przykład podczas zsuwania się węgla po zsuwni, ma ścieranie. Jednak kruszenie się spowodowane ścieraniem się węgla w czasie zsuwania jest znikome w porównaniu z kruszeniem spowodowanym uderzeniem ziaren o blachy i wzajemnie o siebie, podczas spadku węgla z wysokości. Jeżeli przeanalizuje się cały przebieg transportu i przeróbki mechanicznej, to okaże się, że węgiel kruszy się od

momentu jego urobienia do miejsca przeznaczenia głównie wskutek uderzeń ziaren o ścianki urządzeń i wzajemnie o siebie (Stefański 1970). T. Laskowski (1948) w czasie, gdy urabianie węgla nie było jeszcze tak zmechanizowane, stwierdził, że 50% miału węglowego o uziarnieniu poniżej 10 mm powstaje podczas urabiania, a pozostałe 50% podczas transportu i przeróbki mechanicznej. Równocześnie mielenie stanowi ważną fazę w procesie przygotowania węgla do spalania w paleniskach pyłowych i w procesie przygotowania węgla do koksowania. Na zachowanie się węgla w tych procesach duży wpływ mają czynniki wynikające z budowy petrograficznej i chemicznej węgla.

2. ZALEŻNOŚĆ MIĘDZY PODATNOŚCIĄ NA MIELENIE A STOPNIEM UWĘGLENIA SUBSTANCJI ORGANICZNEJ WĘGLA

Zależność między podatnością na mielenie a stopniem uwęglenia badał Dryden (van Krevelen, Schuyer 1959), który stwierdził, że jeśli pominie się wpływ innych czynników, to wskaźnik podatności na mielenie według Hardgrove'a osiąga maksimum w zakresie od 89 do 90% zawartości pierwiastka C w substancji węglowej, czyli dla węgla koksujących (rys. 1). W zakresie tym także twardość według Vickersa osiąga minimum (van Krevelen, Schuyer 1959). Węgłe nisko i wysoko uwęglone wykazują mniejszą podatność na mielenie w porównaniu z węglami o średnim stopniu uwęglenia. Jest to spowodowane zmianami w strukturze węgla i w układzie sił międzycząsteczkowych, warunkujących jego właściwości mechaniczne.



Rys. 1. Zależność między podatnością na mielenie HGI a stopniem uwęglenia, według Drydena (van Krevelen, Schuyer 1959)

Fig. 1. Relationship between grindability HGI and coalification degree according to Dryden (van Krevelen, Schuyer 1959)

W wyniku przemian strukturalnych proces naturalnego uwęglenia zachodzi w dwóch etapach. Pierwszy etap to uwęglenie paliw od celulozy i ligniny przez torfy, węgle brunatne do węgla kamiennych niżej uwęglonych. Drugi etap przebiega od węgla koksowych, które stanowią typy przejściowe, do węgla chudych i antracytu (Roga, Wnękowska, Ihnatowicz 1955). Przemianom strukturalnym w pierwszym stadium towarzyszy zwiększenie stabilizacji wiązań wewnątrzcząsteczkowych. Stabilizacja ta z uwagi na umocnienie struktury przestrzennej osiąga najkorzystniejszy efekt w węglach płomiennych, które wykazują dzięki temu dużą wytrzymałość mechaniczną

i równocześnie małą podatność na mielenie. Za ważny czynnik przyjmuje się także korzystne przestrzenne rozmieszczenie jednostek strukturalnych oraz silne wiązania między tymi jednostkami. Duży wpływ odgrywają czynne grupy tlenowe, głównie fenolowe.

Stopień aromatyzacji grupy węgla od płomiennych do koksowych zmienia się nieznacznie. Proces uwęglania w tym zakresie ogranicza się w zasadzie do stopniowej destrukcji łańcuchów bocznych, odszczepiania reszty grup karboksylowych oraz stopniowego zaniku grup fenolowych. Pociąga to za sobą osłabienie wiązań i zmniejszenie wytrzymałości. W zasadzie nie zachodzi wtedy przegrupowanie jednostek strukturalnych, czego dowodem może być zmniejszenie się gęstości węgla. Węgla koksowe stanowią typy przejściowe, w których nastąpił już zanik grup funkcyjnych. Wykazują one największe rozluźnienie substancji, objawiające się między innymi: minimalną wytrzymałością mechaniczną, minimalną gęstością i maksymalną podatnością na kruszenie (van Krevelen, Schuyer 1959; Roga, Wnękowska, Ihnatowicz 1955).

Od węgla koksowych do chudych i antracytów proces uwęglania przybiera inne formy. Możliwości reakcji w łańcuchach jest coraz mniej ze względu na ich zanik, zmienia się natomiast kondensacja pierścieni aromatycznych. Jednocześnie zagęszcza się struktura przestrzenna. Wytrzymałość mechaniczna, po osiągnięciu minimum w węglach koksowych, wykazuje skłonność do wzrostu. Wynika to – nie tak jak w węglach mniej uwęglonych – z międzygrupowych wiązań funkcyjnych, wodorowych i innych, ale z radykalnej kondensacji pierścieni i powstawania większej liczby silnych wiązań aromatycznych. Zjawiskiem towarzyszącym jest jednoczesne zagęszczenie struktury przestrzennej. Dowodem tego zagęszczenia jest zwiększenie gęstości i wytrzymałości mechanicznej oraz zmniejszenie podatności na kruszenie (Roga, Wnękowska, Ihnatowicz 1955).

Wyniki badań wskaźnika podatności przemiałowej HGI w polskich węglach (Róg 1998) wykazały, że jego wartość waha się od 34 do 86 a czasem nawet do powyżej 100. Najczęściej HGI mieści się w przedziale od 40 do 60 i zwiększa się w miarę wzrostu zawartości popiołu.

W węglach typu 31, 32 i 33 współczynnik HGI wzrasta od 40 dla zawartości popiołu około 5%, do 60 dla zawartości popiołu około 25%. W węglach typu 34 podatność przemiałowa zwiększa się od 50 dla zawartości popiołu około 5% do 60 dla zawartości popiołu wynoszącej w przybliżeniu 25%. Inaczej zachowują się z kolei węgle typowo koksujące, które już z natury wykazują największą podatność przemiałową. W węglach typu 35.1 przyrost substancji mineralnej nie wpływa wyraźnie na współczynnik HGI. Niezależnie od ilości popiołu wskaźnik ten ma wartość 70–80. W węglach typu 35.2 wzrost zawartości substancji mineralnej zdecydowanie zmniejsza podatność przemiałową (Wawrzynkiewicz 2000).

3. PRZEDMIOT BADAŃ

Badania wykonano na 27 próbkach węgla sortymentowych, pochodzących z 16 kopalń Górnośląskiego Zagłębia Węglowego (tabl. 1). Były to sortymenty grube i średnie, wykazujące z natury mniejszą zawartość popiołu niż miały z tej samej ko-

palni. Wybrano węgle o zawartości popiołu poniżej 10%. Pozwoliło to na zminimalizowanie wpływu zawartości popiołu na wartość wskaźnika podatności przemiałowej i lepsze wyeksponowanie wpływu innych czynników jakościowych.

Tablica. 1. Pochodzenie próbek sortymentów grubych i średnich, będących przedmiotem badań

Typ węgla według PN-82/G-97001	Kopalnia	Liczba próbek
31	ZG Centrum	3
	Piast	2
	ZG Piekary I i II	4
	Silesia	2
	Ziemowit	3
	Razem	14
32	Brzeszcze	1
	ZG Bytom III	2
	ZG Piekary I i II	2
	Wieczorek	5
	Razem	10
33	Bielszowice	1
	Brzeszcze	1
	ZG Bytom III	1
	Makoszowy	2
	Sośnica	1
	Razem	6
34	Bielszowice	1
	Halemba	1
	Knurów	1
	Pokój	2
	Polska-Wirek	1
	Szczygłowice	1
	Razem	7
	Sumaryczna liczba próbek	37

4. METODYKA BADAŃ

We wszystkich próbkach określono: podatność przemiałową według Hardgrove'a (HGI), zawartość popiołu i jego skład chemiczny, budowę petrograficzną oraz wskaźnik refleksyjności wityritu (R_o). Wszystkie analizy wykonano zgodnie z obowiązującymi normami.

Pomiar podatności przemiałowej metodą Hardgrove'a (PN-ISO 5074:2002) polega na kruszeniu w młynku kulowo-pierścieniowym 50-gramowej próbki węgla, otrzymanej przez przesianie próbki surowej na sitach o oczkach 18 mm i 600 μm . Kruszenie polega na wykonaniu przez urządzenie mielące $60 \pm 0,25$ obrotów. Następnie skruszony węgiel przesiewa się przez sito o oczkach 75 μm i oblicza masę próbki m , przechodzącej przez sito 75 μm , według wzoru

$$m = 50 - m_1 \quad (1)$$

gdzie m_1 jest masą części próbki zatrzymanej na sicie o oczkach 75 μm , wyrażoną w gramach.

Wartość wskaźnika podatności przemiałowej HGI odczytuje się z wykresu kalibracji, wyznaczonego na podstawie wyników uzyskanych dla co najmniej czterech wzorców o znanej wartości HGI. Wykres kalibracji przedstawia zależność oznaczonej doświadczalnie masy m przechodzącej przez sito o oczkach $75 \mu\text{m}$ od wartości wskaźnika podatności przemiałowej, uzyskanej dla poszczególnych, certyfikowanych materiałów odniesienia.

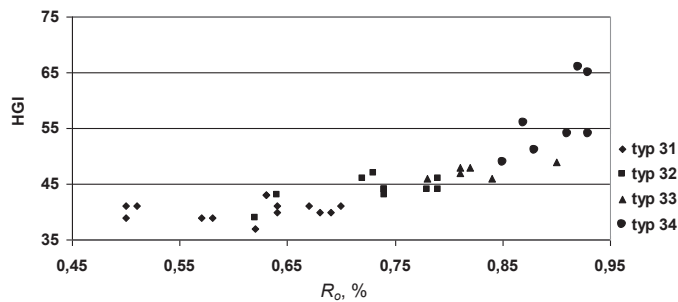
Otrzymane na podstawie wyników badań zależności między podatnością przemiałową i wybranymi parametrami jakościowymi badanych węgli przedstawiono w niniejszym artykule za pomocą linii trendu. Linie trendu są ilustracją graficzną tendencji w seriach danych (Volk 1973). Wiarygodność linii trendu można oceniać wizualnie lub przy użyciu współczynnika korelacji R . Współczynnik korelacji R można odnieść tylko do wykonanych pomiarów i traktować jako miarę siły związku między korelowanymi zmiennymi w przebadanym materiale doświadczalnym.

5. WYNIKI BADAŃ

5.1. Zmienność wskaźnika podatności przemiałowej w badanych węglach

Węgłe kamienne wykazują duże zróżnicowanie pod względem podatności na mielenie. Węgłe, wykazujące podatność przemiałową HGI poniżej 50, są uważane za twarde i trudne do zmielenia (Lorenz 1999). Węgłe, dla których wskaźnik podatności przemiałowej mieści się w granicach od 50 do 70, można uznać za średnio trudne do zmielenia, natomiast węgle, wykazujące HGI powyżej 70, określa się jako łatwe do zmielenia.

Wytypowane do badań węgle, charakteryzowały się zróżnicowanymi wartościami wskaźnika podatności przemiałowej HGI (rys. 2). Na przedstawionym rysunku widać wyraźną zależność tego wskaźnika od typu węgla. W węglach typu 31 zawartość popiołu A^d waha się od 3,5 do 9,9%, a stopień uwęglenia substancji organicznej węgla, określony na podstawie wskaźnika refleksyjności wityrynitru wynosił 0,50–0,70%. Podatność przemiałowa w tych węglach była mała i zmieniała się od 37 do 43. W węglach typu 32 zawartość popiołu A^d wahała się od 2,7 do 6,4%, wskaźnik refleksyjności wityrynitru wynosił 0,62–0,79%, natomiast w węglach typu 33 zawartość popiołu A^d wynosiła 3,2–7,3%, a R_o zmieniało się w granicach 0,78–0,84%. W obu przypadkach podatność przemiałowa nie przekraczała 50. W węglach typu 34 zawartość popiołu A^d zmieniała się od 2,3 do 8,6%, wskaźnik refleksyjności wityrynitru był największy, w porównaniu z wcześniej opisanymi węglami i wynosił 0,85–0,93%. Również wskaźnik HGI wahał się od 49 do 66, co pozwala zaklasyfikować te węgle do średnio trudnych do zmielenia.



Rys. 2. Zmienność podatności przemiałowej HGI w różnych typach węgla w zależności od stopnia uwęglania R_o

Fig. 2. Variability of grindability HGI in different coal types depending on the coalification degree R_o

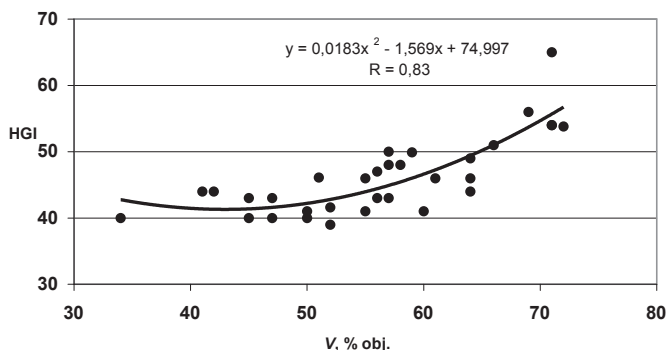
5.2. Wpływ budowy petrograficznej na podatność przemiałową węgla

Podatność węgla na rozdrabnianie jest związana w dużej mierze z własnościami składników petrograficznych (Winnicki 1959; Laskowski, Panuś 1951). Poszczególne odmiany petrograficzne różnią się między sobą wytrzymałością mechaniczną, co powoduje ich grupowanie się w różnych klasach ziarnowych. Ziarna węglowe zbudowane w przewadze z witrynu (witryt), koncentrują się we frakcjach najdrobniejszych. Jest to związane z kruchością witrynu, spowodowaną występowaniem szczelin kontrakcyjnych. Podobnie zachowują się fuzynity i semifuzynity pusto-komórkowe (fuzyty), które jako składniki o dużej podatności do rozdrabniania, skupiają się głównie w pył. Fuzyt, którego komórki są wypełnione substancją obcą, wykazuje bardzo różne właściwości mechaniczne w zależności od tego czy substancja wypełniająca jest pochodzenia organicznego czy mineralnego i czy wypełnienie jest całkowite, co sprzyja wzrostowi wytrzymałości fuzytu i przechodzeniu do grubszych klas ziarnowych. W klasach najgrubszych gromadzą się również najtwardsze ziarna węgla, w budowie których przeważają macerały liptynitu (duryt) (Winnicki 1959; Laskowski, Panuś 1951).

Podstawowymi składnikami w budowie węgla kamiennych są macerały grupy witrynu. Ich zawartość zmienia się w badanych węglach od 47 do 75% obj. Zawartość natomiast drugiej pod względem ilości grupy macerałów – inertynitu, zmienia się w badanych węglach od 15 do 54% obj.

Zmienność wskaźnika HGI w badanych węglach w zależności od zawartości macerałów grupy witrynu przedstawiono na rysunku 3. Wynika z niego, że w miarę wzrostu zawartości witrynu zwiększała się podatność przemiałowa węgla. Współczynnik korelacji dla tej zależności wynosił 0,83. Na wykresie tym nie uwzględniono grup węgla, które znacznie odbiegały od przedstawionej zależności. Węgły te charakteryzowały się dużą zawartością witrynu (powyżej 67 obj.), ale małą podatnością przemiałową ($HGI < 41$) i innymi właściwościami, przedstawionymi w tabelicy 2. W porównaniu z pozostałymi węglami, węgły te wykazywały niski stopień uwęglania substancji organicznej, scharakteryzowany wskaźnikiem refleksyjności witrynu, wynoszącym średnio 0,55%, co odpowiada, według normy PN-82/G-97002, typowi węgla 31 (zakres R_o dla wszystkich badanych węgla wynosi od 0,50 do 0,93%). Ponadto,

w węglach tych zauważono, w stosunku do wszystkich badanych węgli, zwiększoną zawartość popiołu, powyżej 8% (z wyjątkiem próbki 2, w której zawartość popiołu wynosiła 6,29%). Badania mikroskopowe wykazały, że substancja mineralna (siarczki i substancja ilasta) występowała często w postaci wtrąceń i przesyceń w kolinicie, który jest jednym z macerałów grupy wityrytu (fot. 1 i 2), co może być przyczyną zmniejszenia podatności przemiałowej tych węgli.

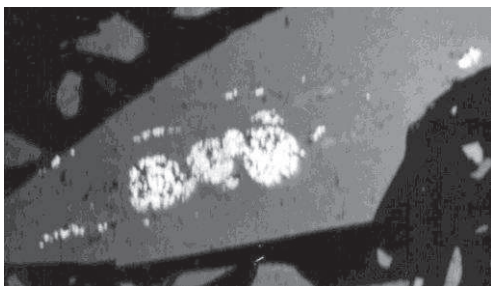


Rys. 3. Zależność podatności przemiałowej węgla HGI od zawartości wityrytu V

Fig. 3. Relationship between coal grindability HGI and vitrinite content V

Tablica 2. Parametry jakościowe węgla nisko uwęglonych o dużej zawartości macerałów grupy wityrytu

Numer próbki	Zawartość wityrytu V, % obj.	Podatność przemiałowa HGI	Refleksyjność wityrytu R_o , %	Zawartość popiołu A_d , %	Zawartość tlenków w popiele, %				
					SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO
1	68	39	0,58	8,92	33,64	25,26	10,59	9,39	5,25
2	70	39	0,50	6,29	32,03	24,84	14,88	8,11	3,36
3	70	41	0,51	8,43	32,40	24,33	10,92	10,36	4,37
4	66	39	0,57	9,53	38,84	27,14	11,62	6,40	3,75
5	67	41	0,50	8,83	40,62	31,02	9,42	5,24	2,77



Fot. 1. Siarczki w kolinicie

Photo 1. Sulfides in kolinite



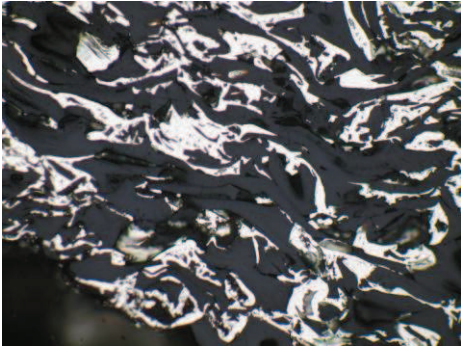
Fot. 2. Wtrącenia substancji ilastej w kolinicie
Photo 2. Inclusions of silty substance in kolinite

Zwrócić należy uwagę również na skład chemiczny popiołu otrzymanego z węgla o dużej zawartości wityrynytu (tabl. 2). Można w nim zaobserwować podwyższoną zawartość SiO_2 – powyżej 32% (dla wszystkich badanych węgla: 10,9–45,4%) i Al_2O_3 – powyżej 24% (dla wszystkich węgla: 9,6–31,8%) oraz mało Fe_2O_3 – poniżej 14,9% (dla wszystkich badanych węgla: 6,2–20,8%), CaO , poniżej 10,5% (dla wszystkich badanych węgla: 5,2–21,7%) i MgO – poniżej 5,2% (przy 2,7–12,5% dla wszystkich węgla).

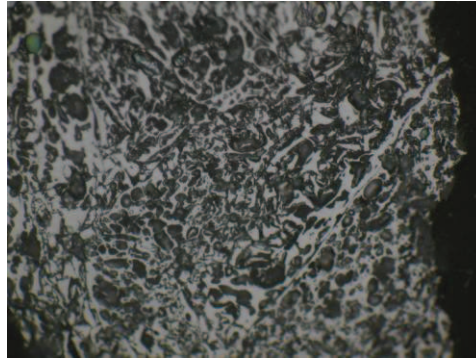
W celu porównania przeprowadzono analizę podatności transportowej węgla o dużej zawartości macerałów grupy inertynytu (tabl. 3). Były to węgle o nieco większym, w porównaniu z wcześniej omówionymi, uwęgleniu (wskaźnik R_o wahał się w nich od 0,64 do 0,90%). Stwierdzono w nich również większy wskaźnik HGI, który dochodził do 54, mniej SiO_2 i Al_2O_3 oraz więcej Fe_2O_3 , CaO i MgO , natomiast znacznie mniej popiołu. Z badań mikroskopowych wynika, że substancja mineralna w tych węglach (piryt i węglany) jest związana często z inertynytem, w którym wypełnia komórki fuzynitu i semifuzynitu (fot. 3 i 4), ale przeważającymi ilościowo formami występowania fuzynitu były również struktury pustokomórkowe (fot. 5), które wraz z substancją mineralną, występującą w formie samodzielnych ziaren (fot. 6, 7), sprzyjały wzrostowi podatności przemiałowej tych węgla.

Tablica 3. Parametry jakościowe węgla o dużej zawartości macerałów grupy inertynytu

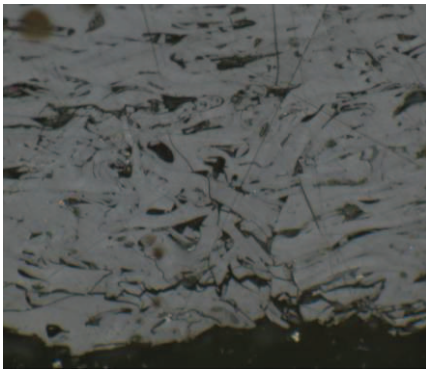
Numer próbki	Zawartość inertynytu I, % obj.	Podatność przemiałowa HGI	Refleksyjność wityrynytu R_o , %	Zawartość popiołu A_d , %	Zawartość tlenków w popiele, %				
					SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO
1	40	40	0,64	3,88	19,47	12,20	18,22	18,12	9,02
2	41	43	0,64	5,13	16,72	12,50	16,00	15,87	11,25
3	42	40	1,68	4,52	20,45	16,20	12,70	15,51	10,05
4	54	46	0,72	3,63	10,98	9,59	17,34	21,65	12,48
5	48	44	0,74	3,18	12,01	10,60	18,38	18,58	9,74
6	48	44	0,74	2,74	16,24	13,60	17,63	15,94	8,49
7	42	49	0,9	4,65	19,94	13,87	17,75	16,92	9,5



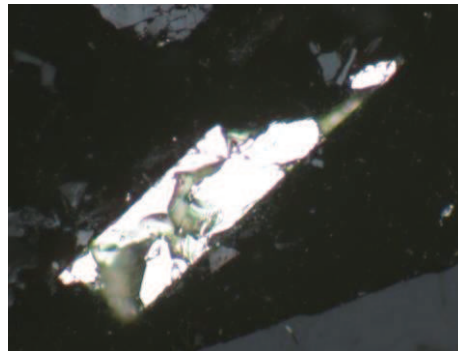
Fot. 3. Siarczki wypełniające komórki fuzynitu
Photo 3. Sulfides filling fusinite cells



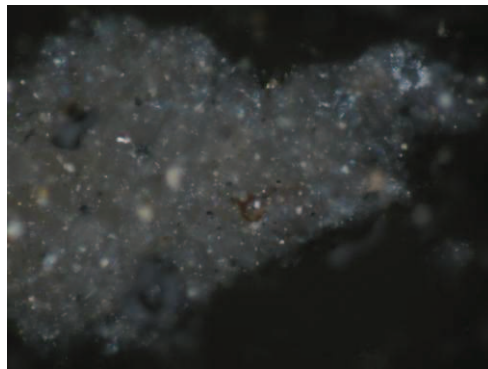
Fot. 4. Węglany wypełniające komórki fuzynitu
Photo 4. Carbonates filling fusinite cells



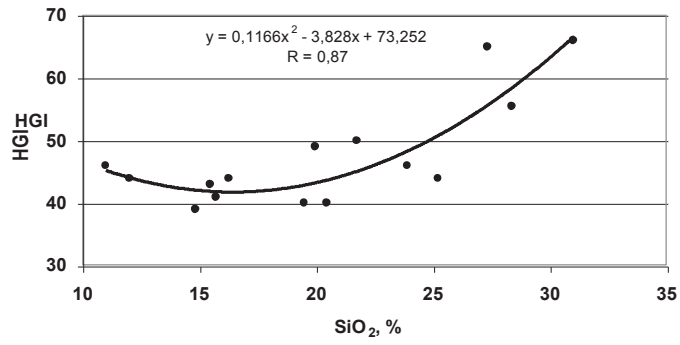
Fot. 5. Fuzyt pustokomórkowy
Photo 5. Hollow-cell fusinite



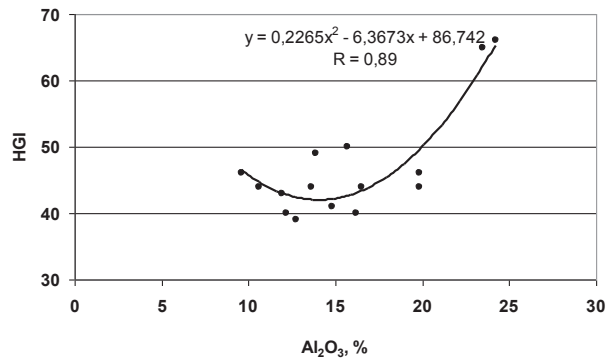
Fot. 6. Siarczki
Photo 6. Sulfides



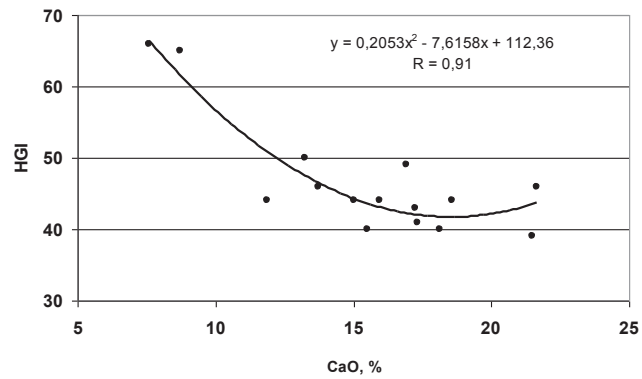
Fot. 7. Substancja ilasta
Photo 7. Silty substance



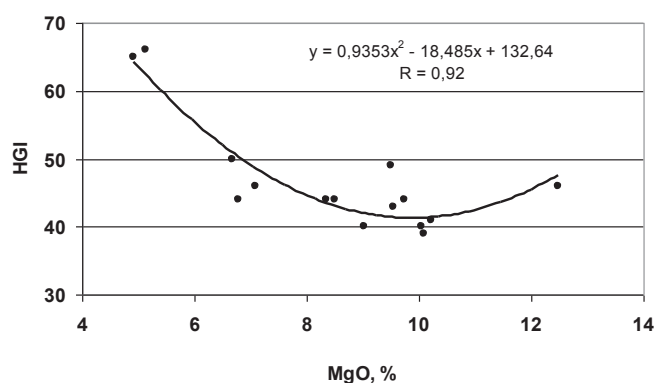
Rys. 4. Zależność podatności przemiałowej węgla HGI od zawartości tlenku krzemu SiO_2 w popiele
 Fig. 4. – Relationship between coal grindability HGI and silicon oxide SiO_2 content in ash



Rys. 5. Zależność podatności przemiałowej węgla HGI od zawartości tlenku glinu Al_2O_3 w popiele
 Fig. 5. – Relationship between coal grindability HGI and aluminium oxide Al_2O_3 content in ash



Rys. 6. Zależność podatności przemiałowej węgla HGI od zawartości tlenku wapnia CaO w popiele
 Fig. 6. Relationship between coal grindability HGI and calcium oxide CaO content in ash



Rys. 7. Zależność podatności przemiałowej węgla HGI od zawartości tlenku magnezu MgO w popiele

Fig. 7. Relationship between coal grindability HGI and magnesium oxide MgO in ash

5.3. Wpływ składu chemicznego popiołu na podatność przemiałową węgla

Na podstawie wyników badań składu chemicznego popiołów otrzymanych z węgla (p. 5.2), można stwierdzić, że na podatność przemiałową węgla ma wpływ nie tylko zawartość popiołu, ale również skład petrograficzny węgla i sposób występowania substancji mineralnej w macerałach (co wymaga prowadzenia dalszych badań) oraz skład chemiczny otrzymanego z niej popiołu. Podczas analizy wpływu składu chemicznego popiołu na podatność przemiałową węgla, istotne zależności uzyskano dla czterech składników popiołu: SiO_2 , Al_2O_3 , CaO i MgO . W analizie tych zależności uwzględniono tylko węgle o zawartości popiołu poniżej 5%. Z rysunków 4–7 wynika, że podatność przemiałowa węgla zwiększała się w miarę wzrostu zawartości SiO_2 , Al_2O_3 oraz w miarę zmniejszania się zawartości CaO i MgO w popiele. Współczynniki korelacji dla tych zależności były duże i wynosiły odpowiednio: 0,87; 0,89; 0,91 i 0,92.

WNIOSKI

Na podstawie wyników badań sformułowano następujące wnioski:

1. Badane węgle charakteryzowały się zróżnicowanymi wartościami wskaźnika podatności przemiałowej HGI. W węglach typu 31 zawartość popiołu A^d wahała się od 3,5 do 9,9%, a stopień uwęglenia substancji organicznej węgla, określony na podstawie wskaźnika refleksyjności wityrynit, wynosił 0,50–0,70%. Podatność przemiałowa w tych węglach była mała i zmieniała się w zakresie od 37 do 43. W węglach typu 32 zawartość popiołu A^d wahała się od 2,7 do 6,4%, wskaźnik refleksyjności wityrynit wynosił 0,62–0,79%, a podatność przemiałowa również była mała (od 39 do 50). W węglu typu 33 zawartość popiołu A^d wynosiła 3,2–7,3%, stopień uwęglenia R_o zmieniał się w granicach 0,78–0,84%, a podatność przemiałowa zmieniała się w wąskim zakresie od 46 do 49. W węglach typu 34 zawartość popiołu A^d zmieniała się od 2,3 do 8,6%, wskaźnik refleksyjności

- witrynit był największy, w porównaniu z wcześniej opisanymi węglami i wynosił 0,85–0,93%. Również HGI, które wahało się w granicach od 49 do 66, pozwala zaklasyfikować te węgle do średnio trudnych do zmielenia.
2. W miarę wzrostu zawartości witrynit zwiększała się podatność przemiałowa węgli. Współczynnik korelacji dla tej zależności wynosił 0,83.
 3. Podatność przemiałowa zwiększała się w miarę wzrostu zawartości SiO_2 i Al_2O_3 oraz w miarę obniżania się zawartości CaO i MgO w popiele. Współczynniki korelacji dla tych zależności były duże i wynosiły odpowiednio: 0,87; 0,89; 0,91 i 0,92.
 4. Od wyżej opisanych zależności odbiegały własności węgli, w budowie petrograficznej których przeważały macerały grupy witrynit (powyżej 67% obj.), a zawartość popiołu, na tle pozostałych węgli wytypowanych do badań, była duża i mieściła się w granicach 8–10%. Charakteryzowały się one małą podatnością przemiałową ($\text{HGI} < 41$). W popiołach z tych węgli stwierdzono zwiększoną zawartość SiO_2 – powyżej 32% (dla wszystkich badanych węgli: 10,9–45,4%) i Al_2O_3 – powyżej 24% (dla wszystkich badanych węgli: 9,6–31,8%) oraz małą zawartość Fe_2O_3 – poniżej 14,9% (dla wszystkich badanych węgli: 6,2–20,8%), CaO , poniżej 10,5% (dla wszystkich węgli: 5,2–21,7%) i MgO – poniżej 5,2% (dla wszystkich badanych węgli: 2,7–12,5%). Substancja mineralna występowała w tych węglach bardzo często w postaci siarczków i substancji ilastej, tworzących wtrącenia i przesycenia w kolinicie, który jest jednym z macerałów grupy witrynit, co może być przyczyną zmniejszenia podatności przemiałowej tych węgli.
 5. W węglach o dużej zawartości macerałów grupy inertynit w porównaniu z węglami, w budowie których przeważają macerały grupy witrynit, stwierdzono znacznie mniej popiołu oraz nieco większy wskaźnik HGI. W składzie chemicznym popiołu z tych węgli obserwowano mniej SiO_2 i Al_2O_3 oraz więcej Fe_2O_3 , CaO i MgO . Z badań mikroskopowych wynika, że przeważającymi ilościowo formami występowania inertynit, były fuzynity i semifuzynity pustokomórkowe, które sprzyjają wzrostowi podatności przemiałowej.
 6. Rozpoznanie wpływu sposobu rozmieszczenia substancji mineralnej w macerałach na podatność przemiałową węgla wymaga przeprowadzenia dalszych wnikliwych badań.

Literatura

1. Chamberlain R., Lockart C., Smyth M. (1994): *Selektywne kruszenie węgla jako środek zwiększania wychodu koncentratu, zmniejszania zawartości popiołu lub minimalizacji udziału drobnych frakcji*. Materiały XII Międzynarodowego Kongresu Przeróbki Węgla, tom I. Kraków, s. 125–139.
2. Czapliński A. (1994): *Węgiel kamienny*. Kraków, Wydaw. AGH.
3. Gruson G. (1957): *Przyczynek do badań nad przygotowaniem węgla do koksowania klasycznego*. Koks Smoła Gaz nr 6, s. 185–191.
4. Laskowski T. (1932): *Wzbogacanie mialu węglowego z punktu widzenia petrografii*. Przegląd Górniczo-Hutniczy nr 11, s. 595–605.
5. Laskowski T. (1948): *Zagadnienie przeróbki mialu w polskim przemyśle węglowym*. Biuletyn Instytutu Naukowo-Badawczego Przemysłu Węglowego, Komunikat nr 23.
6. Laskowski T., Panuś M. (1951): *Petrografia węgla*. Katowice, PWT.

7. Lorenz U. (1999): *Metoda oceny wartości węgla kamiennego energetycznego uwzględniająca skutki jego spalania dla środowiska przyrodniczego*. Prace Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN. Studia Rozprawy Monografie nr 64.
8. PN-ISO 5074:2002 Węgiel kamienny. Oznaczanie wskaźnika podatności transportowej Hardgrove'a.
9. Roga B., Wnękowska L., Ihnatowicz A. (1955): *Chemia węgla*. Warszawa, PWT.
10. Róg L. (1998): *Podatność przemiałowa węgla kamiennych o różnym składzie petrograficznym*. Prace Naukowe GIG, Seria Konferencje nr 24: VII Konferencja na temat: Problemy geologii w ekologii i górnictwie podziemnym, s. 193–199.
11. Stefański M. (1970): *Kruszenie się węgla podczas transportu i przeróbki*. Katowice, Wydaw. „Śląsk”.
12. Świętosławski W., Roga B., Chorąży M. (1932): *Z badań nad poprawą jakości koksu górnośląskiego*. Przegląd Górniczo-Hutniczy nr 2, s. 21–24.
13. Van Krevelen D.W., Schuyer J. (1959): *Węgiel. Chemia węgla i jego struktura*. Warszawa, PWN.
14. Volk W. (1973): *Statystyka stosowana dla inżynierów*. Warszawa, WNT.
15. Wawrzynkiewicz W. (2000): *Prognozowanie podatności przemiałowej węgla na podstawie ich zapopielenia*. Przegląd Górniczy nr 6, s. 22–30.
16. Winnicki J. (1959): *Zachowanie się odmian petrograficznych polskich węgla w czasie kruszenia*. Koks Smoła Gaz nr 4, s. 166–171.
17. Winnicki J., Olszewska K., Magnes C. (1960): *Zmienność składu petrograficznego klas ziarnowych w zależności od sposobu kruszenia węgla kamiennych*. Prace GIG, Komunikat nr 260.

Recenzent: prof. dr hab. Jerzy Sablik