

**Jerzy SABLIK\***

**Romuald BRZEZINA\***

**Krzysztof WIERZCHOWSKI\***

## **WPLYW STOPNIA ZMETAMORFIZOWANIA WĘGLA NA WIELKOŚĆ ZIARN PODLEGAJĄCYCH WYNOSENIE DO PIANY W PROCESIE FLOTACJI**

Przedstawiono wyniki badań wpływu stopnia zmetamorfizowania węgla kamiennego na wielkość ziarn wynoszonych do piany w procesie flotacji. Stwierdzono wpływ stopnia uwęglenia na maksymalne rozmiary ziarn, które mogą w warunkach flotacji utworzyć trwały zespół ziarno-pęcherzyk powietrza i przechodzić do piany flotacyjnej. Dla węgla o najmniejszym uwęgleniu wielkość tę określono na poziomie około 0,2 mm.

### **1. Wstęp**

Ewolucja myśli technologicznej w zakresie wzbogacania mułów węglowych obejmuje także zagadnienie rozmiarów ziarn, które mogą być flotowane. Pod koniec lat sześćdziesiątych do wzbogacania metodą flotacji kierowano ziarna węglowe o średnicach do 0,75 mm, a nawet 1,0 mm. Okres lat siedemdziesiątych to czas, w którym zakładano, że skutecznie flotować można ziarna węglowe o rozmiarach nie przekraczających 0,5 mm. Obecnie kształtuje się przekonanie, że ze względów techniczno-ekonomicznych procesowi flotacji poddawać się powinno muły węglowe w klasach ziarnowych o rozmiarach poniżej 0,2 mm lub nawet poniżej 0,1 mm uwzględniając również możliwości pośrednie. Analiza schematów technologicznych niektórych nowobudowanych lub modernizowanych zakładów na świecie dostarcza przykładów tego typu rozwiązań [Boyles et al. 1989, Gothen et al. 1982].

Zasadność poddawania procesowi wzbogacania metodą flotacji mułów węglowych o obniżonym w stosunku do obecnie stosowanego górnego wymiaru ziarn wynikać może z przyczyn techniczno - ekonomicznych, technologicznych, a także z uwzględnienia charakterystyki materiału poddawanego procesowi flotacji.

Ze względu na fakt, że wzbogacanie metodą flotacji jest procesem stosunkowo drogim w porównaniu z niektórymi innymi metodami, które można

\*Główny Instytut Górnictwa, 40-051 Katowice pl. Gwarków 1

wykorzystać do wzbogacania drobnych węgli, zmniejszenie ilości muiów kierowanych do flotacji przynieść może obniżenie kosztów eksploatacji. Metody, którymi można wzbogacić ziarna dotychczas kierowane do flotacji (np. klasy 0,5\*0,2 mm, 0,5\*0,15 mm lub 0,5\*0,1 mm) to wzbogacanie grawitacyjne w osadzarce (np. w klasie ziarnowej 3,0\*0,2 mm), klasyfikacja w hydrocyklonach w różnych zakresach ziarnowych lub w separatorach spiralnych i na stołach koncentracyjnych (w zależności od technologii wzbogacania ziarn grubszych - w różnych klasach ziarnowych). Górny rozmiar ziarn, które mogą być flotowane zależy natomiast od typu maszyny stosowanej w procesie flotacji.

Istotny wpływ na aktywność flotacyjną węgla ma charakterystyka fizyko-chemiczna materiału wzbogacanego, a szczególnie stopień zmetamorfizowania węgla. Siła przyczepienia ziarna do pęcherzyka powietrza zależy od wartości granicznego kąta zwilżania powierzchni węgla. Siła ta w turbulentnych warunkach występujących w maszynach flotacyjnych decyduje o trwałości zespołu ziarno-pęcherzyk powietrza, a więc istotnie wpływa na prawdopodobieństwo przedostania się ziarna do piany flotacyjnej i do koncentratu.

W dalszej części pracy wykorzystując wyniki badań póltechnicznych przeprowadzonych w Głównym Instytucie Górnictwa dokonano analizy przechodzenia ziarn różnych rozmiarów do koncentratu w zależności od uwęglenia badanych węgli kamiennych.

## 2. Zagadnienia podstawowe

W procesie flotacji do koncentratu przejść mogą tylko te ziarna, które utworzą z pęcherzykami powietrza odpowiednio trwałe zespoły, zdolne do wypłynięcia na powierzchnię zawiesiny i do stania się elementem piany flotacyjnej. Trwałość zespołu ziarno-pęcherzyk powietrza analizowana może być [Gaudin 1963, Scheludko et al. 1976, Schulze 1977]:

- w idealnych statycznych warunkach,
- w warunkach dynamicznych w strefie uspokojenia w komorze flotacyjnej,
- w warunkach dynamicznych w strefie turbulencji w komorze flotacyjnej.

W każdej z tych sytuacji na ziarno działają dwie siły wypadkowe: siła przyczepiania ( $F_p$ ) oraz siła odrywu ( $F_o$ ), ale wielkości ziaren, które mogłyby być wynoszone do piany są różne. Siły przyczepienia opisać można znanym równaniem [Morris, Matthesius 1988]:

$$F_p = \gamma_{LG}(\sin\theta)\pi D$$

gdzie  $\gamma_{LG}$  - napięcie powierzchniowe na granicy ciecz-gaz.

$\theta$  - graniczny kąt zwilżania

D - średnica kontaktu ziarno-pęcherzyk-powietrza

Widać, że siła ta jest funkcją nie tylko hydrofobowości powierzchni ( $\theta$ ), ale także napięcia powierzchniowego fazy ciekłej na granicy z powietrzem ( $\gamma_{LG}$ ). Wynika z tego, że obecne w zawieszinie organiczne substancje polarne siłę przyczepienia obniżają. Siła odrywu  $F_o$  zależy od stanu w jakim zespół ziarno-pęcherzyk powietrza jest analizowany i uwarunkowana jest wieloma czynnikami jak hydrostatyczna siła wyporu, siła grawitacji, opór środowiska, siły ścinające, kształt i wielkość ziarna, stan fizyczny jego powierzchni, wielkość pęcherzyka powietrza itp. [Schulze 1977, Matthesius 1988].

Nie wszystkie te zależności jak np. wpływ na siłę odrywu, kształtu ziarna i stanu fizycznego jego powierzchni opisane zostały ilościowo. W zawieszinie wodnej w warunkach małej turbulencji (w strefie uspokojenia) dla ziarn kulistych i o gładkich powierzchniach wartość siły odrywu zapisać można uproszczonym równaniem [Morris, Matthesius 1988]:

$$F_o = \frac{\pi d_p^3 \rho_p g}{6}$$

gdzie:  $d_p$  - średnica ziarna

$\rho_p$  - gęstość ziarna

$g$  - przyspieszenie ziemskie

Trwałość zespołu ziarno-pęcherzyk powietrza można scharakteryzować współczynnikiem  $\beta$ :

$$\beta = \frac{F_o}{F_p}$$

Zespół ziarno-pęcherzyk powietrza jest trwały kiedy  $\beta < 1$ , a trwałość zespołu rośnie kiedy  $\beta$  maleje. Dla warunków, które założono wyrowadzając podane wyżej równanie na  $F_o$  i  $F_p$  oraz zakładając, że węgiel będzie wykazywał średni stopień zmetamorfizowania wyznaczona została doświadczalnie zależność  $\beta = f(d_p)$ . Analiza tej zależności dowodzi, że w założonych warunkach w strefie uspokojenia wartości  $\beta = 1$  odpowiada ziarno o średnicy 3.15 mm (3150  $\mu\text{m}$ ) [Morris, Matthesius 1988]. Wszystkie ziarna o średnicy mniejszej powinny mieć siłę przyczepienia większą od siły odrywu.

### 3. Część doświadczalna

Badania prowadzono w sześciokomorowej maszynie flotacyjnej typu mechanicznego o pojemności komory 8 dm<sup>3</sup>. Czas flotacji wynosił 300 s dla

Tablica 1

Charakterystyka badanych węgli.

| Kopalnia  | Typ wg. klasyfikacji polskiej | C <sub>daf</sub> % | (O+N) <sub>daf</sub> % | V <sub>daf</sub> % |
|-----------|-------------------------------|--------------------|------------------------|--------------------|
| Siersza   | 31.1                          | 78.32              | 14.91                  | 36.28              |
| Czeczoł   | 31.2/32.1                     | 80.06              | 12.85                  | 36.05              |
| Julian    | 31.2                          | 80.93              | 13.05                  | 36.07              |
| Rydułtowy | 33/34                         | 83.29              | 10.08                  | 38.21              |
| Pniówek   | 34/35.1                       | 86.35              | 8.34                   | 30.63              |
| Morcinek  | 35.1                          | 87.42              | 7.19                   | 29.52              |

Tablica 2

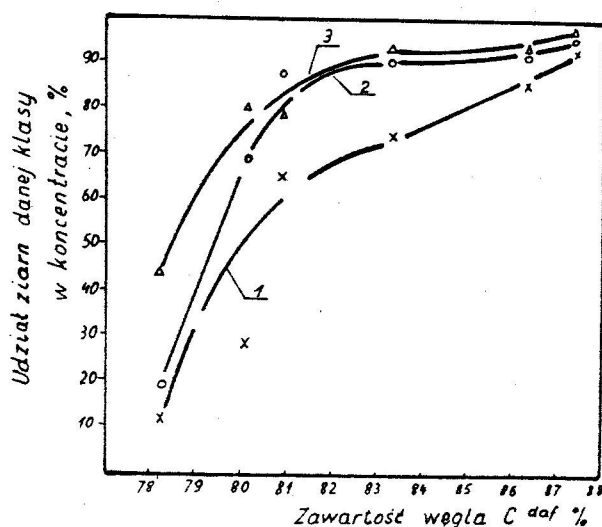
Wyniki flotacji w skali półtechnicznej węgla różnych typów w aspekcie wynoszenia ziarn grubszych do koncentratu.

| Kopalnia<br>klasa<br>ziarna<br>mm | P<br>r<br>o<br>d<br>u<br>k<br>t | Wychód<br>% | Zawar-<br>tość<br>popio-<br>łu<br>% | Wychód<br>klasy<br>ziar-<br>nowej<br>.5-0.3<br>mm<br>% | Zawar-<br>tość<br>popio-<br>łu w<br>klasie<br>.5-0.3<br>mm % | Udział<br>ziarn<br>.5-0.3<br>mm<br>w<br>N,K,O<br>% | Wychód<br>klasy<br>.5-0.1<br>mm<br>% | Zawar-<br>tość<br>popio-<br>łu w<br>klasie<br>.5-0.3<br>mm, % | Udział<br>ziarn<br>.5-0.1<br>mm<br>w<br>N,K,O<br>% |
|-----------------------------------|---------------------------------|-------------|-------------------------------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| SIER-<br>SZA<br>-0.5              | N                               | 100         | 45.42                               | 2.8                                                    | 10.16                                                        | 100                                                | 21.5                                 | 9.93                                                          | 100                                                |
|                                   | K                               | 34.6        | 23.86                               | 0.9                                                    | 6.59                                                         | 11                                                 | 11.6                                 | 8.16                                                          | 19                                                 |
|                                   | O                               | 65.3        | 56.85                               | 3.8                                                    | 10.99                                                        | 89                                                 | 26.7                                 | 16.20                                                         | 82                                                 |
| SIER-<br>SZA<br>-0.2              | N                               | 100         | 48.38                               | -                                                      | -                                                            | -                                                  | 5.5                                  | 8.33                                                          | 100                                                |
|                                   | K                               | 49.3        | 26.12                               | -                                                      | -                                                            | -                                                  | 8.6                                  | 7.42                                                          | 77                                                 |
|                                   | O                               | 50.7        | 71.00                               | -                                                      | -                                                            | -                                                  | 2.5                                  | 13.56                                                         | 23                                                 |
| CZE-<br>CZOT<br>-0.5              | N                               | 100         | 39.85                               | 5.6                                                    | 6.32                                                         | 100                                                | 29.0                                 | 11.91                                                         | 100                                                |
|                                   | K                               | 65.2        | 14.17                               | 2.4                                                    | 4.45                                                         | 28                                                 | 30.9                                 | 4.74                                                          | 69                                                 |
|                                   | O                               | 34.8        | 78.02                               | 11.6                                                   | 7.18                                                         | 72                                                 | 25.3                                 | 24.86                                                         | 31                                                 |
| JUL-<br>IAN<br>-0.5               | N                               | 100         | 39.85                               | 6.3                                                    | 6.91                                                         | 100                                                | 28.1                                 | 10.18                                                         | 100                                                |
|                                   | K                               | 59.8        | 14.17                               | 6.9                                                    | 6.77                                                         | 65                                                 | 41.3                                 | 6.27                                                          | 98                                                 |
|                                   | O                               | 40.2        | 78.02                               | 5.5                                                    | 6.91                                                         | 35                                                 | 8.4                                  | 38.85                                                         | 12                                                 |
| RYDUL-<br>TOWY<br>-0.5            | N                               | 100         | 24.61                               | 6.2                                                    | 7.45                                                         | 100                                                | 36.5                                 | 12.52                                                         | 100                                                |
|                                   | K                               | 79.5        | 10.93                               | 6.4                                                    | 3.51                                                         | 74                                                 | 41.7                                 | 7.25                                                          | 90                                                 |
|                                   | O                               | 20.5        | 74.90                               | 9.0                                                    | 19.36                                                        | 26                                                 | 16.3                                 | 45.59                                                         | 10                                                 |
| RYDUL-<br>TOWY<br>-0.3            | N                               | 100         | 25.77                               | -                                                      | -                                                            | -                                                  | 37.6                                 | 13.52                                                         | 100                                                |
|                                   | K                               | 77.6        | 13.50                               | -                                                      | -                                                            | -                                                  | 43.7                                 | 11.88                                                         | 90                                                 |
|                                   | O                               | 22.4        | 75.85                               | -                                                      | -                                                            | -                                                  | 16.5                                 | 56.93                                                         | 10                                                 |
| PNIÓ-<br>WEK<br>-0.5              | N                               | 100         | 15.27                               | 8.7                                                    | 5.10                                                         | 100                                                | 49.6                                 | 7.30                                                          | 100                                                |
|                                   | K                               | 78.2        | 5.20                                | 9.5                                                    | 2.16                                                         | 85                                                 | 58.3                                 | 2.76                                                          | 92                                                 |
|                                   | O                               | 20.8        | 51.33                               | 6.0                                                    | 7.65                                                         | 15                                                 | 19.5                                 | 21.36                                                         | 8                                                  |
| MOR-<br>CINEK<br>-0.5             | N                               | 100         | 20.13                               | 11.6                                                   | 4.65                                                         | 100                                                | 49.2                                 | 5.92                                                          | 100                                                |
|                                   | K                               | 84.3        | 11.00                               | 12.9                                                   | 4.09                                                         | 94                                                 | 56.1                                 | 5.19                                                          | 96                                                 |
|                                   | O                               | 15.7        | 69.24                               | 4.6                                                    | 14.97                                                        | 6                                                  | 12.2                                 | 36.04                                                         | 4                                                  |

N - nadawa, K - koncentrat, O - odpady.

węgla typu 31-32 oraz 210 s dla węgla typu 34-35. Wzbogacaniu flotacyjnemu poddano muł o uziarnieniu mniejszym od 0,5 mm, w jednym przypadku o uziarnieniu mniejszym od 0,3 mm oraz w jednym o uziarnieniu mniejszym od 0,2 mm. Koncentracja części stałych w nadawie wynosiła w każdym przypadku 100 kg/m<sup>3</sup>. Zawiesinę flotacyjną kontaktowano z odczynnikami w aparacie do kondycjonowania UFOZ (urządzenie wielokolaboratoryjne) przed maszyną flotacyjną. Stosowano optymalne dla danego węgla tak z punktu widzenia składu jak i dawki jednostkowej odczynników flotacyjnych [Sablik 1980, Sablik, Wierzchowski 1987]. Czas trwania każdego doświadczenia wynosił 2 godziny. Po ustabilizowaniu procesu flotacji pobierano próbki nadawy, koncentratu i odpadów w czasie co 5 minut. Próbki te po uśrednieniu posłużyły do wykonania analiz granulometrycznych i popiołowych.

Badano aktywność flotacyjną zawiesin mułowych węgla, których krótka charakterystykę przedstawiono w tabelicy 1. Zgodnie z założeniem reprezentują one węgle kamienne o różnym stopniu zmetamorfizowania o zawartości węgla pierwiastkowego od około 78 % do ponad 87 %. Różnice w zawartości tlenu w tych węglach powodują niewątpliwie różnice w hydrofobowości ich powierzchni oraz różnice w siłach przyłączenia ziarna do pęcherzyka powietrza.



Rys.1. Wpływ stopnia uwęglenia na wielkość ziarn węglowych wynoszonych do piany w procesie flotacji węgla.

- 1 - klasa ziarnowa 0.5-0.3 mm
- 2 - klasa ziarnowa 0.3-0.1 mm
- 3 - klasa ziarnowa 0.3-0.1 mm

- 1 - size range 0.5-0.3 mm
- 2 - size range 0.5-0.1 mm
- 3 - size range 0.3-0.1 mm

Fig.1. The influence of the grade of metamorphism on grain's size which can be conveyed into froth in course of flotation process.

#### 4. Wyniki badań

W tablicy 2 zestawiono wyniki flotacji każdego z badanych węgli, dane określające podział ziarn klas  $0,5^*0,3$  mm oraz  $0,5^*0,1$  mm znajdujących się w zawieszynie kierowanej do flotacji między koncentrat i odpady oraz zawarte w poszczególnych wyodrębnionych częściach koncentratu i odpadów popioły. Na rysunku 1 przedstawiono graficznie zależność wyrażonej w procentach ilości ziarn, które w klasach  $0,5^*0,3$  mm,  $0,3^*0,1$  mm oraz  $0,5^*0,1$  mm przeszły do koncentratu od zawartości węgla pierwiastkowego  $C^{daf}$  (stopnia zmetamorfizowania) w badanych węglach. Przedstawione na rysunku wyniki dowodzą znacznego wpływu stopnia uwęglenia na górny rozmiar ziarn, które przeszły do koncentratu. W przypadku węgla z kop. Siersza (typ 31.1), tylko około 11 % ziarn klasy  $0,5^*0,3$  mm oraz około 45 % ziarn klasy  $0,3^*0,1$  mm przeszło w procesie flotacji do koncentratu, a pozostałe do odpadów, zaś w przypadku węgla z kop. Morcinek (typ 35.1) liczby te wynoszą odpowiednio 94 i 97 %. Ilość ziarn klasy  $0,5^*0,1$  mm wyniesionych do koncentratu przyjmuje wartości pośrednie względem omówionych wyżej. Odpowiednio wartości analizowanych parametrów pośrednie i proporcjonalne do uwęglenia wystąpiły w przypadku pozostałych badanych węgli.

O właściwym przebiegu procesu wynoszenia do piany ziarn danej klasy decyduje nie tylko ich ilość ale także zawartość popiołu w ziarnach, które pozostały w odpadach. W tablicy 2 zamieszczono dane o zawartości popiołu w klasach ziarnowych, zarówno tych które przeszły do koncentratu jak i tych, które pozostały w odpadach flotacyjnych. Jest rzeczą charakterystyczną, że w przypadku węgla z kop. Siersza zawartość popiołu w ziarnach klas  $0,5^*0,3$  mm oraz  $0,5^*0,1$  mm, które przeszły do odpadów jest znacznie mniejsza niż w końcowym koncentracie flotacyjnym. W przypadku węgla z kop. Czeczot i Julian już tylko zawarte w odpadach ziarna klasy  $0,5^*0,3$  mm mają popiół mniejszy niż końcowy koncentrat, a ilość takich ziarn wynosi 72 % (kop. Czeczot) i 35 % (kop. Julian). Dla pozostałych kopalń popioły ziarn badanych klas, które przeszły do odpadów są większe od popiołów w koncentratkach końcowych. Znaczy to, że do odpadów przeszły większe ziarna wtedy, kiedy w ich składzie znaczny udział miały substancje mineralne.

Flotacja zawiesiny mułowej o obniżonym do 0,2 mm górnym wymiarze ziarn z kop. Siersza wykazała, że do koncentratu wyniesionych zostało 77 % ziarn klasy  $0,2^*0,1$  mm. Zawartość popiołu w odpadach końcowych osiągnęła wartość 71 %, jednak część ziarn klasy  $0,2^*0,1$  mm, która została w odpadach (23 %) zawiera znacznie mniej popiołu niż koncentrat końcowy. Obniżenie górnego rozmiaru ziarn w zawieszynie flotacyjnej z kop. Rydziutowy do 0,3 mm nie dało istotnej poprawy w zakresie wynoszenia

ziarn danej klasy. Zarówno z nadaw o uziarnieniu  $-0,5$  mm jak i  $-0,3$  mm ponad 90 % ziarn klasy  $0,5+0,1$  mm ( $0,3+0,1$  mm) przeszło do koncentratu.

### 5. Dyskusja wyników

Przedstawione wyniki badań potwierdzają ogólną prawidłowość wynikającą z rozważań teoretycznych i stanowiącą, że siły przyczepienia ziarn do pęcherzyków powietrza zależne są od stopnia uwęglenia i wraz z nim rosną lub maleją. Wynika z tego, że maksymalne rozmiary ziarn, które mogą utworzyć trwały zespół z pęcherzykiem powietrza i być wynoszone do piany są różne i zależne od uwęglenia. Dla ziarn węgla typu 31.1 nie przekraczają one wartości  $0,2$  mm. Efekt ten nie zanika pod wpływem odczynników flotacyjnych, co oznacza, że wpływ energii powierzchniowej węgla na wartość siły przyczepienia występuje także wtedy kiedy powierzchnia ziarna pokryta jest odczynnikiem flotacyjnym optymalnym dla danego typu węgla. Zagadnienie to wymaga dalszych badań i wyjaśnienia przyczyn takiego działania sił na powierzchni węgla, szczególnie węgla o małym stopniu zmetamorfizowania. Wprawdzie pozytywne wyniki potwierdzają ogólną prawidłowość dotyczącą zależności między stopniem zmetamorfizowania węgla, a siłą przyczepienia ziarn do pęcherzyka powietrza, jednak istnieje zasadnicza różnica między przewidywanymi wynikami z rozważań teoretycznych [Morris, Matthesius 1988], a wynikami badań empirycznych w zakresie górnych rozmiarów ziarn, które mogą być flotowane. Z rozważań teoretycznych wynika, że siła przyczepienia ziarn do pęcherzyka powietrza jest odpowiednio duża aby wynieść do piany flotacyjnej ziarna o średnicy kilku mm, a więc ziarna znacznie większe niż to wynika z doświadczeń. Należy sądzić że przyczyna tej rozbieżności leży zarówno po stronie niedoskonałej teorii jak i nie w pełni efektywnej praktyki flotowania węgla kamiennych.

### 6. Literatura

- Boyles M.R., Southerland G.L., Cox J.N.: 1989, Coal vol. 93, nr 11, 68-72.
- Gaudin A.M., Flotacja, wyd. Śląsk, Katowice, 1963.
- Gathen R., Becker M., Erdmann W., Wilczyński P.: 1982, Gluckauf vol. 118, nr 5, 258-264.
- Morris M.R., Matthesius G.A.: 1988, J.S. Afr. Inst. Min. Metall. vol. 88, nr 12, 385-391.
- Sablik J.: Flotowalność polskich węgla kamiennych jako funkcja stopnia ich utlenienia. Prace GIG, ser. dodatkowa, Katowice 1980.
- Sablik J., Wierzchowski K.: 1987, Przegląd Górniczy, V 43., Nr 5, 15-19.
- Scheludko A., Toshev B.A., Bojadjev D.T.: 1976, J. Chem. Soc. Faraday

Scheludko A., Toshev B.A., Bojadjev D.T.: 1976, J. Chem. Soc. Faraday Trans. I, vol. 72, 2815-2828.

Schulze N.J.: 1977 Int. J. Miner. Process, 241-259

#### Abstract

Sablik J., Brzezina R., Wierzchowski K., 1991, Coal metamorphism degree and the size of grains being conveyed to froth during flotation process. Physicochemical Problems of Mineral Processing. 24, 67-74.

The relation between coal metamorphism degree and maximum size of grains which can be conveyed into froth in the course of flotation has been investigated. It was found, that the sizes of grains which can form durable bubble-particle units depend on the degree of metamorphism. For coals of the lowest coalification the maximum grain size value of 0.2 mm has been established.