

*Barbara Tora**, *Peter Fecko***, *Alicja Nowak**, *Zbigniew Tajchman**

BADANIE ZALEŻNOŚCI PODATNOŚCI NA MIELENIE OD WYBRANYCH PARAMETRÓW WĘGLA KAMIENNEGO

1. Wprowadzenie

W 2009 roku wielkość importu węgla do Polski przekroczyła eksport. Jednym z aspektów zmiany pochodzenia węgla przeznaczonych dla energetyki jest konieczność wprowadzenia jednolitych metod oceny jakości węgla pochodzącego z różnych źródeł. Ważną cechą, decydującą o przydatności węgla do spalania w energetyce zawodowej jest jego podatność na mielenie — energochłonność procesu mielenia mieszanek energetycznych [1].

W niniejszej pracy podjęto badania nad określeniem zależności parametru charakteryzującego podatność na mielenie (indeksu Hardgrove'a) od wybranych właściwości fizykochemicznych węgla.

2. Metoda Hardgrove'a oznaczania podatności przemiałowej [3, 4]

Podatność na mielenie oznacza opór, jaki stawia rozdrabniany materiał w czasie rozdrabniania. Zależy on od twardości, zwartości (spójności), tekstury i struktury materiału, typu siatki krystalicznej, składników mineralnych i innych własności fizycznych i chemicznych. Podatność przemiałowa węgla zależy od składu petrograficznego masy organicznej oraz składu mineralnego części niepalnych. Wpływa na przepustowość i wydajność mielenia w procesie przygotowania mieszanek energetycznych. Im wyższy wskaźnik przemiałowości, tym lepsza podatność przemiałowa, a zatem mniejsza ilość energii potrzebna do mielenia.

Jedną ze standardowych metod oznaczania podatności przemiałowej węgla jest metoda Hardgrove'a. Metoda została opracowana w roku 1932 przede wszystkim do badania podat-

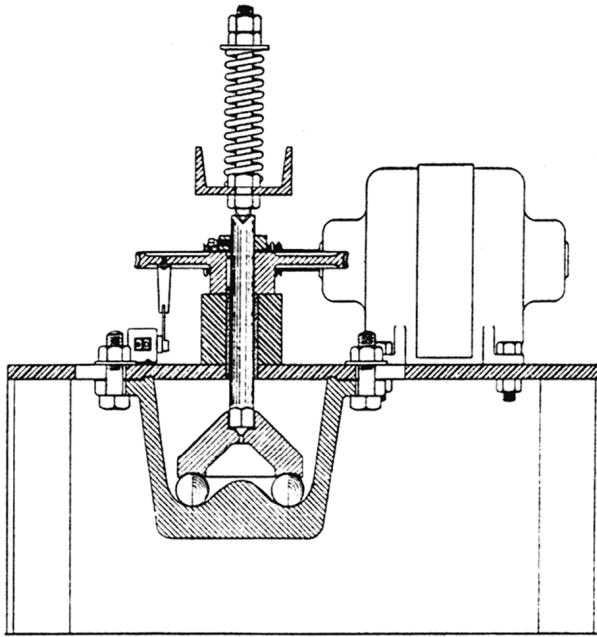
* Wydział Górnictwa i Geoinżynierii, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

** VSB TU Ostrava, Czechy

*** Artykuł został przygotowany w ramach pracy statutowej AGH nr 11.11.100.238

ności na mielenie węgla kamiennych. W roku 1945 została wprowadzona do przemysłu przez Amerykańskie Towarzystwo Testowania Materiałów ASTM (*American Society for Testing Materials*) pod nazwą ASTM D. 409. W roku 1951 metoda ta została uznana za badanie standardowe używane w wielu krajach (PN/G 04530, DIN 51 742, ISO 5074).

Na rysunku 1 przedstawiono schemat urządzenia do oznaczania indeksu mielności Hardgrove'a, zbudowanego w roku 1932 przez twórcę metody.



Rys. 1. Układ zbudowany w roku 1932 przez R.M. Hardgrove'a do wyznaczania indeksu mielności Hardgrove'a [3]

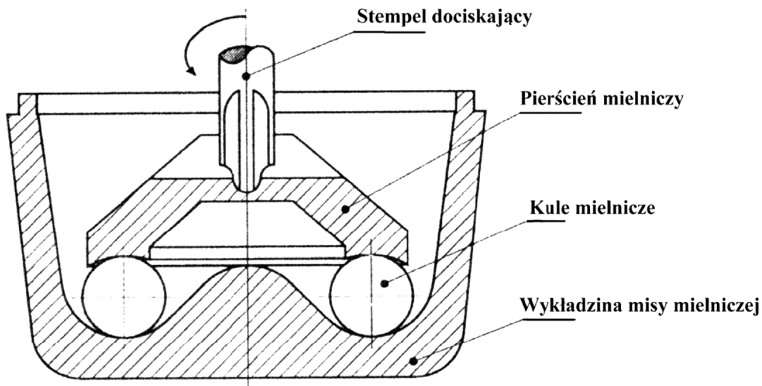
Przy założeniu, że nakład energetyczny na rozdrabnianie jest proporcjonalny do nowo utworzonej powierzchni (zgodnie z prawem Rittingera), w metodzie tej porównuje się zmianę powierzchni badanej próbki węgla ze zmianą powierzchni węgla wzorcowego. W metodzie Hardgrove'a wzorcowym materiałem porównawczym jest węgiel z kopalni St. Jerome z pokładu Kittanning w Somerset w stanie Pensylwania w USA, dla którego indeks podatności przemiałowej Hardgrove'a wynosi 100. Urządzenie zbudowane przez Hardgrove'a jest młynem kulowo-pierścieniowym. Na rysunkach 2 pokazano schematycznie elementy mielące urządzenia Hardgrove'a do oznaczania podatności na mielenie.

Młynek Hardgrove'a składa się z następujących elementów [2]:

- odpowiednio ukształtowanej miski, która jest równocześnie bieżnią mielniczą;
- ośmiu stalowych kul mielniczych o średnicy $25,4 \pm 0,13$ mm;

- stalowego, wirującego pierścienia mielniczego o średnicy zewnętrznej 98,4 mm i masie 1,1 kg; pierścień ten pełni równocześnie rolę elementu napędzającego i dociskającego stalowe kule mielnicze do bieżni;
- stempla dociskającego wraz z kołem zębatym przekładni redukcyjnej o łącznej masie 2,0 kg, pełniącego równocześnie rolę wału napędzającego pierścień mielniczy;
- trzech obciążników ołowianych o łącznej masie 25,9 kg (nie są one przedstawione na rysunku).

Łączna masa pierścienia mielniczego dociskająca kule mielnicze, trzech obciążników oraz stempla z kołem zębatym, powinna wynosić $29,0 \pm 0,2$ kg. Prędkość obrotowa górnego elementu mielącego powinna wynosić od 19 do 21 obr./min.



Rys. 2. Młynek kulowo-pierścieniowy Hardgrove'a — przekrój [8]

3. Badania własne

Badania przeprowadzono na 21 próbkach węgla pochodzącego z różnych źródeł określając dla nich indeks Hardgrove'a oraz skład ziarnowy, zawartość popiołu, zawartość wilgoci, zawartość siarki, zawartość części lotnych, spiekalność, wskaźnik wolnego wydymania, dyfuzję, zawartość fosforu i wartość opałową. Wyniki przedstawiono w tabelach 1 i 2.

3.1. Określenie podatności na mielenie

W celu przeprowadzenia badania próbkę testową o masie $50 \pm 0,01$ g i uziarnieniu $0,60 \div 1,19$ mm poddaje się mieleniu w młynie testowym. Po wykonaniu przez wirujący pierścień mielniczy $60 \pm 0,25$ obrotów zmieloną próbkę przesiewa się na sicie o wielkości oczek 0,075 mm. Uzyskana masa G_{75} ziaren większych od wymiaru oczek sita stanowi podstawę do określenia indeksu mielenności Hardgrove'a.

$$GrH = 13 + 6,93 \cdot (G_{75}) \quad (1)$$

gdzie G_{75} to masa klasy ziarnowej powyżej 0,075 mm w [g].

Powyższy wzór jest ważny jedynie w odniesieniu do podanej klasy ziarnowej i dla danego badanego materiału. Indeks mielności Hardgrove'a określanany jest jedynie na podstawie tylko jednego punktu na krzywej składu ziarnowego.

Korzyści, jakie można uzyskać, stosując test Hardgrove'a, to:

- niewielka ilość materiału potrzebnego do analizy,
- prostota badań,
- krótki czas wykonania badania i szybkie uzyskanie wyniku.

Węgiel wymagający podczas mielenia dużych nakładów energetycznych ma niską wartość indeksu Hardgrove'a. Wysokie wartości indeksu Hardgrove'a świadczą o łatwości rozdrabniania danego węgla.

Nie istnieje też prosta zależność między wartością indeksu Hardgrove'a a energią potrzebną na zmielenie danej próbki węgla. Wartość indeksu mielności $GrH = 100$ nie świadczy o tym, że do zmielenia zużyto dwa razy więcej energii niż w przypadku próbki o indeksie mielności Hardgrove'a równym $GrH = 50$.

Wartości indeksu Hardgrove'a GrH dla węgla stosowanego w energetyce wahają się w granicach od 30 do 100, sporadycznie przekraczając 100.

Wadą metody Hardgrove'a jest to, że na podstawie dokonanych pomiarów nie można bezpośrednio określić zapotrzebowania na energię, jaką trzeba zużyć w celu rozdrobnienia badanej próbki. Przeniesienie wyników uzyskanych z testu na warunki przemysłowe procesu mielenia jest możliwe przy spełnieniu odpowiednich wymagań. Praktyczne warunki ruchowe można uzyskać poprzez korelację indeksu mielności Hardgrove'a z indeksem pracy Bonda W_i według zależności [5]:

$$W_i = \frac{525,8}{GrH} \quad (2)$$

gdzie GrH to indeks mielności Hardgrove'a.

W tabeli 1 przedstawiono wyniki oznaczenia Indeksu Hardgrove'a dla badanych próbek węgla. Wyniki oznaczono według dwu norm [4, 5]: PN-ISO 5074:2002 (nowej) oraz PN-G-04530:1978 (starej). Norma PN-IS) 5074 jest tłumaczeniem angielskiej wersji normy międzynarodowej ISO 5074:1995 i jest wprowadzona jako norma identyczna z wprowadzoną normą międzynarodową. W normie podano metodę oznaczania wskaźnika podatności przemiałowej węgla kamiennego za pomocą urządzenia Hardgrove'a. Podano także procedurę kalibracji urządzenia i przygotowanie próbek wzorcowych węglowych materiałów odniesienia.

TABELA 1

Oznaczenie podatności przemiałowej metodą Hardgove'a

Numer próbki	Pomiar 1, [g]	Pomiar 2, [g]	PN-ISO 5074				PN-G-04530			
			m-i, [g]	HGI ₁	m ₂ , [g]	HGI ₂	HGI _{sr}	Gr-Hr	GrH ₂	GrH _{sr}
1	33,04	33,62	16,96	124	16,38	120	122	131	127	129
2	33,74	34,95	16,26	120	15,05	112	116	126	117	122
3	38,80	39,20	11,20	86	10,80	83	85	91	88	89
4	44,51	44,00	5,49	48	6,00	51	50	51	55	53
5	43,98	43,80	6,02	51	6,20	53	52	55	56	55
6	34,81	35,45	15,19	112	14,55	108	110	118	114	116
7	43,27	42,61	6,73	56	7,39	60	58	60	64j	62
8	42,46	42,66	7,54	62	7,34	60	61	65	64	65
9	35,22	35,16	14,78	110	14,84	110	110	115	116	116
10	41,99	42,55	8,01	65	7,45	61	63	69	65	67
11	43,69	44,33	6,31	53	5,67	49j	51	57	52	55
12	44,38	44,20	5,62	49	5,80	50	49	52	53	53
13	42,38	40,94	7,62	62	9,06	72	67	66	76	71
14	45,16	45,23	4,84	44	4,77	43	43	47	46	46
15	41,34	41,48	8,66	69	8,52	68	69	73	72	73
16	38,11	39,52	11,89	90	10,48	81	86	95	86	90
17	44,20	44,45	5,80	50	5,55	48	49	53	51	52
18	44,16	44,38	5,84	50	5,62	49	49	53	52	53
19	44,06	44,36	5,94	51	5,64	49	50	54	52	53
20	42,12	42,40	7,88	64	7,60	62	63	68	66	67
21	42,32	43,20	7,68	62	6,80	57	60	66	60	63

TABELA 2
Oznaczenie właściwości próbek węgla

Numer próbki	Zawartość popiołu, [%]	Zawartość wilgoci, [%]	Zawartość siarki, [%]	Spiekalność, Roga Index	Wskaźnik wolnego wydymania, FSI	Dylatacja B, [%]	Zawartość fosforu, [%]	Wartość opałowa, [MJ/kg]	Indeks Hardgrove'a GrH_{sr}
1	7,5	9,8	0,78	68	7,2	82	0,05	29,4	129
2	8,0	9,5	0,01	75	6,7	96	0,01	29,4	122
3	5,6	8,6	0,31	80	7,1	85	0,06	28,7	89
4	6,5	8,9	0,62	78	6,7	50	0,05	26,1	53
5	4,8	9,1	0,62	67	5,3	52	0,05	26,1	55
6	6,7	8,9	0,84	68	8,0	43	0,08	29,1	116
7	8,9	7,5	0,66	81	6,0	69	0,08	26,6	62
8	12,0	8,4	0,89	70	6,0	86	0,03	26,4	65
9	11,4	8,5	0,80	74	5,0	49	0,01	29,6	116
10	8,9	8,9	0,84	78	6,1	49	0,01	27,1	67
11	6,8	9,1	0,94	67	4,9	50	0,02	16,1	55
12	7,9	8,9	0,88	80	5,0	63	0,03	27,1	53
13	5,6	8,4	0,68	76	7,2	120	0,03	27,2	71
14	6,8	9,3	0,60	77	6,3	138	0,03	26,2	46
15	6,9	9,2	0,14	85	6,8	110	0,06	25,6	73
16	3,5	8,9	0,67	80	8,1	120	0,05	29,0	90
17	5,6	8,9	0,67	68	6,8	63	0,02	29,1	52
18	6,3	8,8	0,56	62	6,9	51	0,04	26,8	53
19	7,4	8,4	0,76	64	4,9	49	0,05	26,8	53
20	6,8	8,3	0,61	79	6,2	67	0,06	26,8	67
21	6,9	8,2	0,57	80	57,0	71	0,07	26,7	63

W stosunku do normy zastępowanej wprowadzono kalibrację urządzenia pomiarowego za pomocą węglowych materiałów odniesienia oraz odczyt wyniku z wykresu kalibracyjnego. Oznaczenie Indeksu Hardgrove'a według nowej normy daje wyniki systematycznie niższe o 2 do 5 jednostek w stosunku do oznaczeń wykonywanych według starej normy.

3.2. Określenie korelacji wybranych parametrów fizykochemicznych węgla z wartością indeksu Hardgrove'a

Badania przeprowadzono na 21 próbkach węgla pochodzącego z Polski, Czech, Rosji oraz mieszanek energetycznych z tych węgli.

W tabeli 2 zamieszczono wyniki oznaczenia charakterystyki węgla.

4. Analiza wyników i wnioski

Określenie właściwości węgla, w szczególności określenie podatności na mielenie ma ogromne znaczenie z uwagi na fakt, że uziarnienie węgla odgrywa ogromną rolę dla każdego sposobu wykorzystania węgla — spalania, zgazowania, wzbogacania i pirolizy. Największą część węgla jest wykorzystywana do produkcji energii elektrycznej. Zużycie energii na rozdrobnienie (mielenie) jest znaczne i wynosi 5÷15 kWh/t [1, 2].

Właściwości mechaniczne węgla takie jak moduł sprężystości, ściśliwość, wytrzymałość i mikrotwardość nie są wystarczające dla określenia podatności na mielenie. Dla określenia zachowania się różnych węgli w procesie rozdrabniania wykorzystuje się testy podatności na mielenie. Powszechnie stosuje się test Hardgrove'a, w którym określa się podatność na mielenie badanego węgla w stosunku do standardowego węgla, którego wartość podatności (indeks Hardgrove'a — HGI) przyjęto jako równą 100. Błąd określenia podatności, według normy amerykańskiej, nie powinien przekraczać 2–3 jednostek HGI.

Węgłe nisko uwęglone zachowują się w procesie mielenia inaczej (gorzej się rozdrabniają) niż węgle wysokouwęglone. Najłatwiej miela się węgle o średniej i niskiej zawartości części lotnych.

Zawartość wilgoci 5–6% jest skorelowana z niską wartością Indeksu Hardgrove'a. HGI spada gwałtownie ze wzrostem wilgotności. HGI rośnie z zawartością siarki.

Heterogeniczny charakter węgla powoduje trudności w przewidywaniu wartości HGI. W kolejnym etapie badań przeprowadzona zostanie analiza wpływu składu petrograficznego próbek węgla na wartość indeksu Hardgrove'a.

LITERATURA

- [1] *Woyciechowski W.*: Praca doktorska. Untersuchungen zum Mahlverhalten von Kohlen und Kohlenmischungen. Technische Universität Clausthal, 1995
- [2] *Tora B.*: Model procesu mielenia. VSB TU, Ostrava, 2001
- [3] PN-78/G-04530: 1978 — Węgiel kamienny. Oznaczanie podatności przemiałowej metodą Hardgrove'a

- [4] PN-ISO 5074:2002 — Oznaczanie podatności przemiałowej metodą Hardgrove'a
- [5] *Ryncarz A.*: Badania podatności na mielenie węgla metodą indeksu pracy Bonda i wskaźnika Hardgrove'a. *Przegląd Górniczy*, 9, 1994, s. 21–24
- [6] *Żelkowski J., Woyciechowski W., Strugała A.*: Oznaczanie podatności przemiałowej metodą Hardgrove'a — przegląd doświadczeń. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria Górnictwo*, z. 231, Gliwice, Dział Wydawnictw Politechniki Śląskiej, 1996
- [7] *Tora B., Kogut K.*: Węglowe mieszanki energetyczne. Właściwości, mielenie, spalanie, UWND AGH, Kraków, 2005