

Stanisław F. ŚCIESZKA, Grzegorz MATLOK

BADANIA KRUSZALNOŚCI I ŚCIERALNOŚCI WĘGLA

Streszczenie. Własności minerałów związane ze zużyciem, takie jak ścieralność i kruszalność są tematem niniejszej pracy.

TEST METHOD OF GRINDABILITY AND ABRASIVENESS OF COAL

Summary. The mineral properties which affect wear, such as mineral abrasiveness and grindability are direct interest in this investigation.

ZERKLEINERUNGS - UND VERSCHLEISS BARKEITUNTERSUCHUNGEN DER KOHLE

Zusammenfassung. Im Artikel wurden die mit der Abnutzung verbundenen Eigenschaften von Mineralien dergestellt. Hauptsächlich wurden die Verschleissbarkeit und Zerkleinerung behandelt.

1. WPROWADZENIE

Teorie opisujące zjawiska mechanicznego kruszenia minerałów (węgla, rud metali i inn.) zostały podane przez Rittingera, Kicka, Bonda i innych. Opisy matematyczne i metody badań kruszalności i ścieralności są mało dokładne i niewystarczające, zwłaszcza dla potrzeb praktyki, np. przy projektowaniu urządzeń do mielenia węgla dla energetyki.

Badania efektywności procesu mielenia węgla w młynach kulowych wykazują, że koszty mielenia zależą od stopnia wypełnienia młyna wsadem, jednostkowego zużycia energii i własności fizykomechanicznych minerałów oraz intensywności zużycia elementów konstrukcyjnych młyna.

Przedstawiona symulacyjna metoda badań kruszalności i ścieralności, zgodnie z kryteriami podobieństwa mechanicznego, zakłada dwa dominujące oddziaływania między wsadem (węglem) a elementami kruszącymi (kulami) w młynach przemysłowych, a mianowicie oddziaływanie statyczne i udarowe. Założenie powyższe pozwala na szacowanie parametrów kruszenia i włożonej pracy na mielenie minerałów oraz zużycia elementów młyna (kule).

Wyniki badań modelowych pozwolą na optymalizację parametrów techniczno-eksploatacyjnych projektowanych młynów do kruszenia węgla oraz innych minerałów.

2. RELACJE MIĘDZY ENERGIA WŁOŻONĄ A KRUSZENIEM

Minerały (węgiel i rudy metali) są niejednorodnymi substancjami tak pod względem fizycznym, jak i chemicznym z przypadkowym rozkładem defektów (makropęknięcia, mikropęknięcia, nieciągłości na granicy pomiędzy pojedynczymi kryształami) w strukturze minerału [1, 2, 3].

Energia dostarczana podczas kruszenia jest zużywana głównie na tworzenie nowej powierzchni, ale także na plastyczne deformacje, sprężyste deformacje, tarcie zewnętrzne, drgania i hałas. Dokonanie rozdziału tej energii na poszczególne zjawiska jest bardzo trudne. Można powiedzieć, że większość energii zużyta na wewnętrzne i zewnętrzne tarcie jest zamieniana na ciepło. Proces kruszenia minerałów oraz

zuywania element6w konstrukcyjnych zalezy od struktury minera6w, mi6dzy innymi od: - stopnia koncentracji i wymiar6w twardych cz6stek (np. kwarcu), wilgotno6ci oraz od koncentracji chemicznie aktywnych gaz6w maj6cych wp6lyw na p6kni6cia [4, 5, 6, 7, 8].

Kruszalno6c i 6cieralno6c s6 to w6asno6ci zwi6zane nie tylko z danym minera6em, ale takze z metod6 kruszenia, czyli s6 to w6asno6ci systemowe. Dlatego tez wykorzystanie wprost wyników bada6 laboratoryjnych w przemy6le moze prowadzi6 do b6d6w.

Pomimo wymienionych trudno6ci w sformu6owaniu hipotez matematycznych dotycz6cych procesu rozdrobnienia zalezn6c mi6dzy energi6 w6oion6 a now6 powierzchni6 moze by6 podana w spos6b nast6puj6cy (zalezn6c ta bazuje na hipotezie Rittingera):

$$\text{PRACA W6O6ZONA} = K (\text{nowa powierzchnia})^\alpha$$

albo

$$W = K (1/P - 1/F)^\alpha$$

gdzie:

- $\alpha = 1 - C$ - wsp66czynn timeresji,
- C - sta6a zalezna od niezgodno6ci pomi6dzy teoretyczn6 zmian6 wymiaru wsadu podan6 przez Rittingera a rzeczywistym rozdrobnieniem pr6bki,
- $W = E/m$ - energia w6oion6 na jednostk6 masy podczas redukcji z okre6lonego rozmiaru minera6u wsadowego do okre6lonego rozmiaru minera6u wyj6ciowego (do okre6lonego wagowego udzia6u poszczeg66lnych frakcji),
- K - sta6a zalezna od sposobu kruszenia i sprawno6ci kruszenia ,
- F - wska6nik rozmiaru wsadu - d6ugo6c boku kwadratowego otworu, przez kt6ry przechodzi 80% wagowego udzia6u wsadu,
- P - wska6nik rozmiaru produktu - d6ugo6c boku kwadratowego otworu, przez kt6ry przechodzi 80% wagowego udzia6u produktu.

Eksperymenty przeprowadzone na wybranych pr6bkach (rodzajach) w6g6a wykaza6y, ze przybliiona warto6c wsp66czynn timeresji α wynosi 0,5.

Dla określenia względnej pracy jednostkowej podczas rozdrabniania zastosowano wskaźnik W_i , wprowadzony wcześniej przez Bonda.

W_i [$J g^{-1}$] - praca włożona na jeden gram wsadu potrzebna do zredukowania rozmiarów, tak aby 80% wsadu przeszło przez kwadratowy otwór sita o długości boku $75 \mu m$.

Dla wszystkich wartości F i P wkład pracy W jest proporcjonalny do $[(1/P) - (1/F)]^{0,5}$

$$W[(1/P) - (1/F)]^{0,5} = W[(F-P)/(PF)]^{0,5} = W_i[1/75]^{0,5}$$

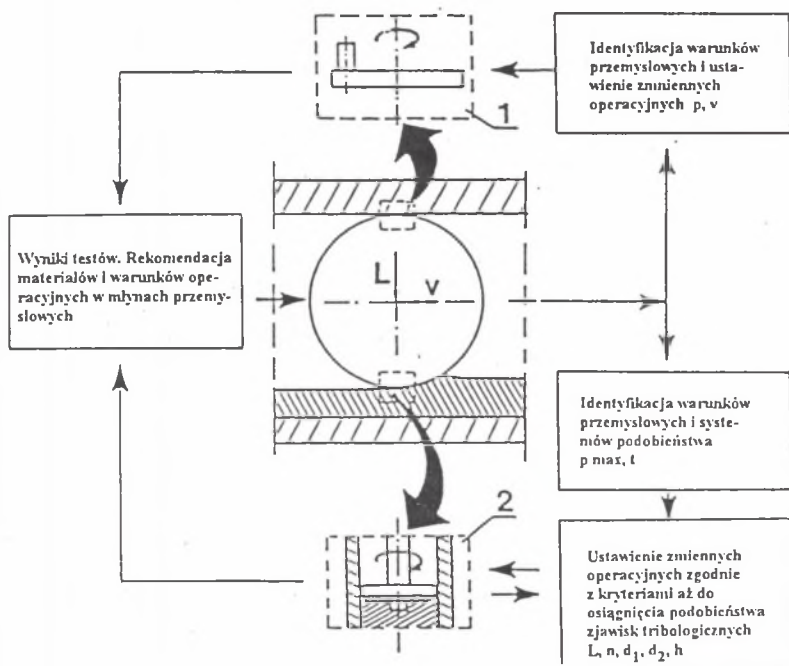
$$W = W_i[(F-P)/F]^{0,5} (75/P)^{0,5}$$

3. ZJAWISKA KRUSZENIA I ZUŻYCIA ZACHODZĄCE W MŁYNACH KULOWYCH O DZIAŁANIU STATYCZNYM I O DZIAŁANIU UDAROWYM

Podczas rozdrabniania minerału w młynach zachodzą trzy główne zjawiska, tj.: udar, ścieranie statyczne, rozgniatanie. Procentowy udział każdego z tych zjawisk w procesie kruszenia zależy od rodzaju młyna.

Warunki tribologiczne panujące w młynach kulowych opisane są przez takie wielkości, jak: rozkład nacisków jednostkowych, maksymalne naciski jednostkowe, gradient prędkości ślizgających się warstw wsadu, prędkości uderzania i temperatury panujące w strefie mielenia minerału [9, 10, 11].

Na rysunkach 1 i 2 pokazano sposób identyfikacji i ustalenia parametrów operacyjnych w badaniach symulujących warunki przemysłowe.



Rys. 1. Sposób ustawienia parametrów operacyjnych w badaniach symulujących warunki przemysłowe w młynach typu statycznego:

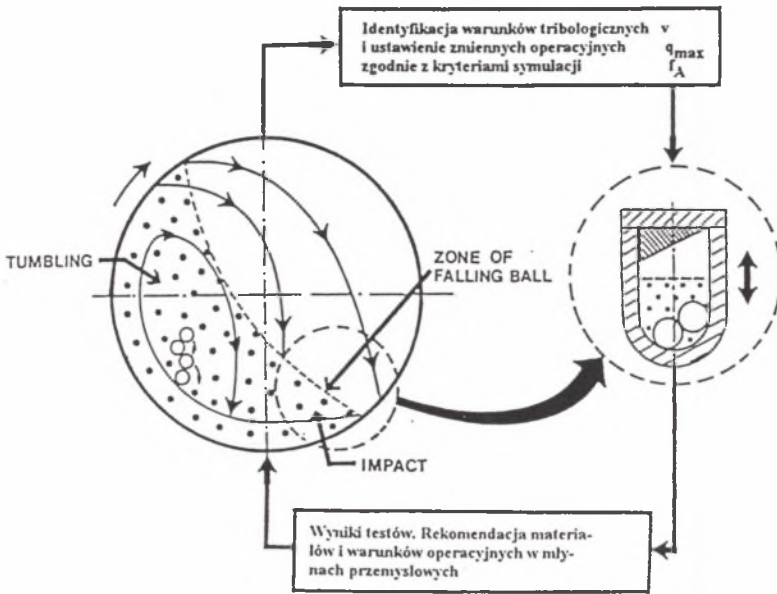
1 - symulacja warunków panujących na styku kuli i górnej bieżni,

2 - symulacja warunków panujących na styku kuli z warstwą minerału (dolnej bieżni)

Fig. 1. Simulative tribo-testing inside the pulverizer:

1 - the simulation of the conditions on the ball-upper race interface,

2 - the simulation of the tribo-codition in the ball-mineral layer system

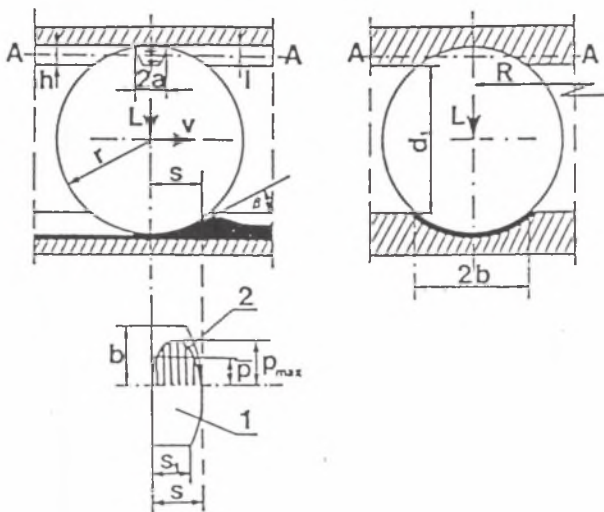


Rys. 2. Sposób ustawienia parametrów operacyjnych w badaniach symulujących warunki przemysłowe w młynach typu uderowego

Fig. 2. Simulative tribo-testing of phenomena inside the tumbling mill

3.1. Model procesów kruszenia i zużycia zachodzących w młynach typu statycznego

Rysunek 3 przedstawia fragment młyna podczas pracy. Tribologiczne warunki panujące w młynie są opisane przez: rozkład nacisków jednostkowych, gradient prędkości poślizgu, temperaturę wewnątrz strefy kruszenia węgla oraz temperaturę na powierzchni pomiędzy węglem a elementami kruszącymi. Ze względu na postępujące zużycie materiału geometria układu ulega ciągłej zmianie. Do określenia nacisku jednostkowego pomiędzy kulą a warstwą węgla skorzystano ze schematu na rys.3.



Rys. 3. Uproszczony diagram kontaktu pomiędzy kulą i górną bieżnią oraz pomiędzy kulą i dolną bieżnią, gdzie: A-A oś chwilowego obrotu

1 - strefa kontaktu,

2 - rozkład nacisków jednostkowych na styku kuli z warstwą minerału

Fig.3. Simplified diagram of the contact between the ball and upper race, and the ball and a mineral layer, where: A-A is the instantaneous axis of rotation

1 - the area of contact,

2 - the pressure distribution at the interface between the ball and the bed of particulate mineral

Dane liczbowe przyjęto z młyna firmy Babcock .

Dla młynów typu E przyjęto:

$$L = 120 \text{ kN}; \quad 2r = d = 0,98 \text{ m}; \quad b = 0,32 \text{ m}; \quad \beta = 16^\circ; \quad d_1 = 0,742 \text{ m}$$

Dla:

$$s = r \sin\beta \quad i \quad s_1 = d_1/2 \sin\beta$$

$$s = 0,135 \text{ m} \quad i \quad s_1 = 0,102 \text{ m}$$

Pole kontaktu pomiędzy warstwami zostało obliczone z równania:

$$A = b s_1 + r s \arcsin(b/r) = 0,08 \text{ m}^2$$

Średni nacisk na powierzchni styku kuli z warstwą węgla

$$p = L/A = 1,5 \text{ MPa}$$

Wartość maksymalnego nacisku jednostkowego została przyjęta jako charakterystyczna dla danego młyna. Podobne naciski wywołano w przyrządzie laboratoryjnym, w którym sile normalnej $N = 2000 \text{ [N]}$ odpowiadało $p_{\max} = 2,83 \text{ MPa}$. Maksymalna prędkość poślizgu pomiędzy kulą a warstwą węgla została wyznaczona wg wzoru [13]:

$$V_{s \max} = V [(h-l)/(r-l) + b/R] = 1,55 \text{ m s}^{-1},$$

gdzie:

$$V = (n/30) \pi R = 4,67 \text{ m s}^{-1}$$

$$h = 0,12 \text{ m}$$

$$l = 0,06 \text{ m}$$

$$R = 1,65 \text{ m}$$

$$n = 27 \text{ min}^{-1}$$

Warunki cieplne istniejące wewnątrz młyna powinny umożliwiać odparowanie wody zawartej we wsadzie. Właściwości suszące młyna zależą od stopnia wypełnienia młyna wsadem i temperatury powietrza wlotowego. Niektóre typy kruszarek są zaprojektowane do pracy przy nominalnej temperaturze wlotowej około 700 K .

W strefie ścinania kruszonego węgla panuje temperatura około 400 K , czyli niższa niż temperatura powietrza wlotowego. Zastosowanie prędkości poślizgu w przyrządzie $V_{s \max} = 1,55 \text{ m s}^{-1}$ spowodowało powstanie temperatury wyższej niż w młynach przemysłowych. Ponieważ temperatura w strefie kruszenia węgla została uznana za ważniejsze kryterium podobieństwa niż prędkość poślizgu w strefie ścinania, wartość prędkości została dobrana tak, aby zagwarantować generowanie temperatury takiej jak w młynach przemysłowych. Punktem krytycznym dla tej temperatury jest temperatura zapłonu węgla, gdyż węgiel wtedy zmienia gwałtownie swoje własności fizykochemiczne.

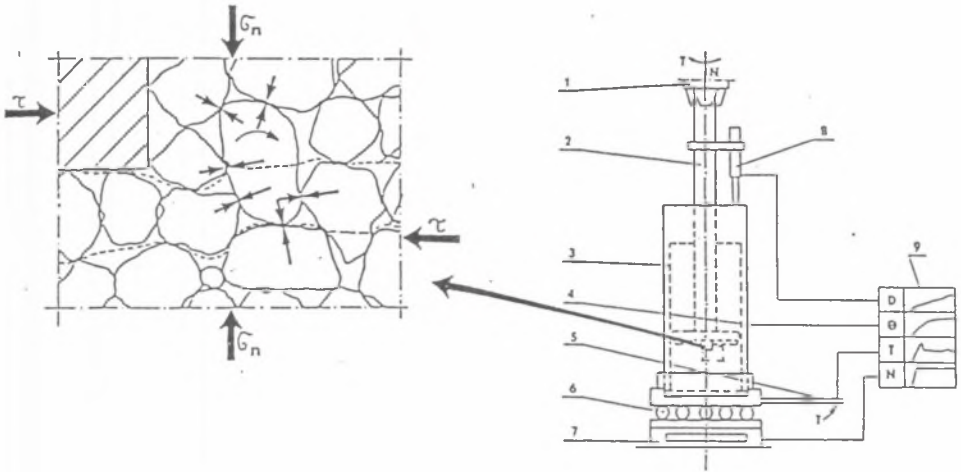
Dla proponowanego przyrządu przyjęto prędkość:

$$V_{s \max} = 0,157 \text{ m s}^{-1}, \text{ tj. } n = 100 \text{ min}^{-1} \text{ [12].}$$

Dla minerałów różnych od węgla zarówno temperatura, jak i wilgotność nie posiada tak dużego wpływu na proces jak w przypadku węgla [14].

Głównymi elementami aparatury, której schemat przedstawiono na rys. 4, są:

- cylinder o średnicy wewnętrznej 30 mm, do którego wkładana jest 30-gramowa próbka węgla,
- element kruszący składający się z dysku umieszczonego na końcu sworznia,
- poprzeczka przymocowana do dysku wykonana z materiału przeznaczonego do badania zużycia.



Rys. 4. Schemat urządzenia badawczego oraz interpretacja wzajemnego oddziaływania pomiędzy cząsteczkami minerału a poprzeczką w strefie ścinania:

- | | |
|------------------------|-------------------------------|
| 1 - uchwyt wiertarki, | 6 - łożysko wzdłużne, |
| 2 - wałek przenoszący, | 7 - siłomierz, |
| 3 - cylinder, | 8 - wskaźnik przemieszczenia, |
| 4 - termopara, | 9 - rejestrator |
| 5 - momentomierz, | |

Fig. 4. Schematic diagram of apparatus, and interpretation of interaction between the particulate mineral and the bar within the shear zone:

- | | |
|----------------------------|-----------------------------|
| 1 - drill chuck, | 6 - thrust bearing, |
| 2 - drive shaft, | 7 - force indicator, |
| 3 - cylindrical container, | 8 - displacement indicator, |
| 4 - thermocouple, | 9 - recorder |
| 5 - torque indicator, | |

Próbka węgla przygotowana zgodnie z normą [15] umieszczona jest na dnie cylindra, a następnie element kruszący, po uprzednim włożeniu do cylindra, wykonuje 400 obrotów wokół osi sworznia lub wykonuje obroty do momentu dotknięcia dna cylindra.

Pomiarom podlega ubytek masy poprzeczki oraz moment podczas procesu kruszenia.

Przedstawiona procedura jest ważna dla węgla i dla innych minerałów. Metoda symuluje warunki w młynach, gdzie kruszenie następuje poprzez toczenie się kul na poziomej obracającej się płycie [16].

3.2. Model procesów kruszenia i zużycia zachodzących w młynach typu dynamicznego

Głównym zjawiskiem zachodzącym w udarowych młynach kulowych jest udarowe oddziaływanie spadającego węgla i kul na ściany młyna.

Uproszczony schemat udarowego młyna kulowego przedstawia rys.2.

Zaproponowana metoda symulująca warunki istniejące w udarowym młynie kulowym pociąga za sobą użycie elektromagnetycznego wibratora (EMV) i komory z dwoma kulami w środku.

Ilość energii włożonej i pochłoniętej przez system kruszący określa równanie:

$$EI = 0,3 \omega^2 A^2 M_c t_d ,$$

gdzie:

EI - ilość energii rozproszonej (przekazanej do wsadu) [J] ,

ω - prędkość kątowa [rad s⁻¹],

A - amplituda [m],

M_c - masa wsadu [kg],

t_d - czas trwania testu [s].

W komorze umiejscowionej na wibratorsie umieszcza się 30 g węgla uprzednio przesianego, zgodnie z normą [15], wraz z dwoma kulami. Proces kruszenia zachodzi na skutek oddziaływania (uderzenia) kul pomiędzy sobą, węglem i ścianami komory. W celu wprowadzenia składowej poślizgu w procesie udaru pokrywa została nachylona.

Kruszalność i ścieralność nie są wewnętrznymi właściwościami minerałów, lecz systemów kruszenia. Dlatego też konieczne jest stworzenie zespołu warunków odwzorujących rzeczywistość oraz utrzymanie stałych ich wartości podczas badania próbek. Odpowiednie dobranie i zachowanie warunków podczas testów umożliwia porównanie wyników uzyskanych podczas doświadczeń z wynikami kruszalności i

ścieralności materiałów stosowanych w przemyśle. Podczas badań częstotliwość wynosiła $n = 50$ Hz ; amplituda $A = 0,005$ m. Wartości tych wielkości zostały dobrane na podstawie teorii podobieństwa, przyjmując jako kryterium podobieństwa energię uderzenia.

4. PODSTAWOWE WSKAŹNIKI PROCESU MIELENIA MINERAŁÓW

W instalacjach przemysłowych proces kruszenia zachodzi do momentu, w którym mineralna cząstka osiągnie wymiar umożliwiający opuszczanie młyna. Czas tego procesu zależy od sprawności młyna i od własności minerałów, głównie kruszalności. Wskaźniki używane obecnie do opisu procesu kruszenia minerałów są znane jako: HGI - współczynnik kruszalności wg Hardgrove'a [15] oraz wskaźnik Bonda W_i .

Ścieralność minerału może być określona kilkoma sposobami. W przypadku węgla tradycyjna metoda oparta jest na procedurze podanej przez Yanceya (1951), przedstawionej w normie brytyjskiej BS 1016 1980, wprowadzającej wskaźnik ścieralności.

Proces zużycia materiałów zachodzący w młynie kulowym jest zależny od kruszalności wsadu (im wyższa kruszalność wsadu, tym mniej czasu trwa jego pobyt w młynie), ścieralności (im mniejsza ścieralność, tym mniejsze współczynniki zużycia materiałów konstrukcyjnych).

Metody testujące podane w rozdziałach 3.1 i 3.2 oraz metoda określająca ścieralność względną [16] łączą dwa zjawiska: zjawisko kruszenia minerału i zjawisko zużycia elementów konstrukcyjnych, ale tylko w metodzie zaprezentowanej w rozdziale 3.1 (rys.4). Ziarna, które osiągnęły zadany wcześniej wymiar, opuszczają strefę mielenia przez szczelinę pomiędzy ruchomym dyskiem, na którym zamocowano poprzeczkę pracującą (próbka materiału konstrukcyjnego) a cylindrem. W tej metodzie zjawisku ścinania warstwy minerału towarzyszy zjawisko zużywania się poprzeczki w wyniku ślizgowego oddziaływania cząstek minerału na jej powierzchnię. Łatwość rozdrobnienia minerału charakteryzuje tzw. wskaźnik rozdrobnienia IC. Wskaźnik rozdrobnienia IC, np. dla węgla jest podawany w miligramach sproszkowanego węgla (frakcja mniejsza od $75 \mu\text{m}$) na jednostkę energii dostarczonej (Joule). W rozpatrywanej metodzie następuje wzajemne przemieszanie się warstw minerału wymuszone ruchem poprzeczki. Metoda pozwala na powiązanie zużycia materiału

poprzeczki pracującej z minerałem rozdrobnionym. Zarówno w kulowym młynie przemysłowym (model statyczny), jak i w metodzie laboratoryjnej podczas kruszenia twardych cząstek (np. kwarc) następuje lokalny gwałtowny wzrost skrawania i bruzdowania, tzn. zwiększone zużycie ściernie. Własności ściernie minerałów określa współczynnik ścieralności AF i współczynnik intensywności ścieralności IA.

AF - masa metalu zużytego do zmielenia 1 kg ściśle określonego wsadu w ściśle określonych warunkach (wyrażona w miligramach zużytego materiału konstrukcyjnego na kilogram produktu),

IA - masa zużytego materiału (wyrażona w miligramach) z jednego m² powierzchni czołowej pracującej poprzeczki w ciągu 1s pracy.

Odporność materiałów na zużycie ściernie jest podawana za pomocą współczynników odporności na ścieranie WR i względnej odporności na ścieranie.

WR - energia włożona do zużycia jednego grama wirującej poprzeczki przy ścieraniu określonego minerału w ściśle określonych warunkach wyrażona [MJ/g].

RWR - stosunek odporności na zużycie ściernie badanego materiału konstrukcyjnego do odporności na zużycie ściernie stali węglowej (materiał standardowy).

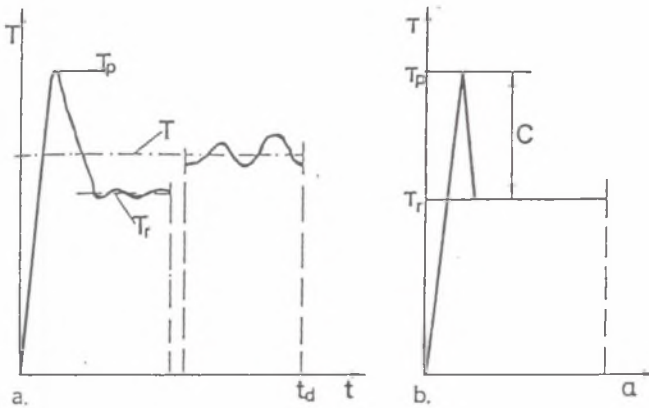
Siły tnące podczas kruszenia muszą pokonać opór, jaki stawia materiał kruszony, którego maksymalna wartość jest głównie zależna od wytrzymałości mielonego materiału na ścinanie oraz oporów tarcia ślizgowego i tarcia tocznego przesuwających się warstw minerału. W momencie zerwania połączeń kształtowo ciernych (siły tnące w momencie zerwania osiągają wartości maksymalne) przez siły tnące następuje przesuwanie się warstw minerałów oraz kruszenie zablokowanych ze sobą cząstek. Wielkość sił tnących zależy także od kształtu i wzajemnego usytuowania ziaren kruszonych (akcja blokowania).

Na rys.5 zobrazowane jest typowe zachowanie się minerału podczas ścinania w maszynie badawczej.

Wykres naprężenia stycznego zawiera wartość szczytową i szczytkową. Podczas próby w początkowym okresie wartość naprężenia stycznego wzrasta do wartości maksymalnej przy prawie zerowym przemieszczeniu się poprzeczki.

Po osiągnięciu przez naprężenia styczne wartości maksymalnych występuje względne przemieszczenie się poprzeczki i części rudy oraz zniszczenie istniejących połączeń kształtowych (rys.4).

Do kontynuacji procesu kruszenia potrzebna jest tylko szczytkowa wartość naprężeń ścinających (rys.5). Różnica pomiędzy wartością szczytową a szczytkową została nazwana kohezją pozorną minerału i oznaczona przez C.



Rys. 5. Wykres zmian naprężeń w funkcji czasu t (a); teoretyczny wykres zmian naprężeń w funkcji kąta α (b)

Fig. 5. Torque diagram (a) and schematic representation of fine material behaviour in shear tests (b)

Maksymalna wartość naprężenia ścinającego może być wyznaczona z zależności:

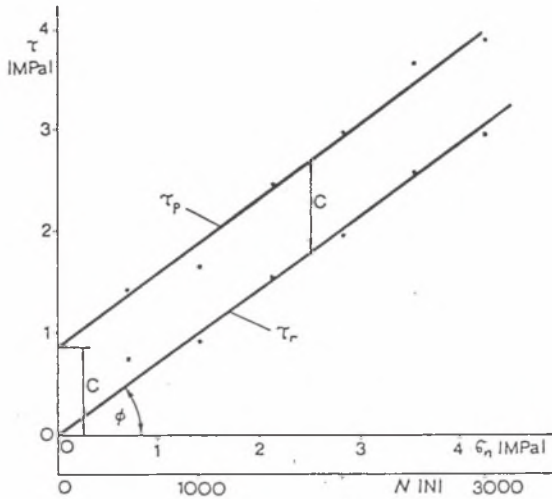
$$\tau_{\max} = C + \sigma_n \operatorname{tg} \phi ,$$

gdzie:

- C - kohezja pozorna [MPa],
- σ_n - naprężenie normalne [MPa],
- ϕ - kąt tarcia wewnętrznego [deg].

Funkcję zmiany naprężeń ścinających w zależności od kohezji pozornej(C), naprężenia normalnego (σ_n) i kąta tarcia wewnętrznego (ϕ) przedstawiono na rys.6.

Dla określenia parametrów związanych z procesem rozdrabniania i zużycia przeprowadzono serię badań. Celem tych badań było zestawienie stosowanych metod testowania kruszalności i ścieralności minerałów z nową proponowaną metodą oraz określenie własności węgli mających wpływ na zużycie ściernie materiałów konstruk-



Rys. 6. Wykres zmian naprężeń ścinających w zależności od naprężenia normalnego z uwzględnieniem kąta tarcia wewnętrznego (ϕ) oraz kohezji pozornej (C)

Fig. 6. Shear strength of fine coal as a function of normal stress and parameters ϕ and C

cyjnych. W tym celu przeprowadzono badania w pięciu kopalniach: Camden, Duvha, Grootvlei, Herdina, Kriel. Chemiczne analizy przebadanych węgli zamieszczono w tabelicy 1. Pełny zestaw wyników określający właściwości fizyczne przebadanych węgla zamieszczono w tabelicy 2.

Wartości współczynników ścieralności AF, IA podano dla dwóch różnych materiałów poprzeczki pracującej:

- stal węglowa (określona przez BS 1016 (1980)),
- żeliwo (materiał stosowany na stoły w młynach typu statycznego).

Na korzyść nowej metody przemawiają: łatwość przeprowadzania testów, możliwość spełnienia kryteriów podobieństwa mechanicznego i dokładniej zdefiniowane warunki ścierania.

Standardowa metoda testująca [BS 1016 1980] nie symuluje procesu zużycia ściernego w młynach typu statycznego. Prędkość względna pomiędzy metalową poprzeczką a warstwą cząstek minerału, jak również siły występujące pomiędzy poprzeczką a styczną warstwą minerału znacznie odbiegają od wielkości występujących w przemysłowych młynach.

Tablica 1

Skład chemiczny pięciu wybranych rodzajów węgla

	Camden (%)	Duvha (%)	Grootvlei (%)	Hendrina (%)	Kriel (%)
Analiza przybliżona					
Wilgotność właściwa	3,86	5,95	6,34	3,80	4,53
Zawartość popiołu	23,86	15,12	22,15	19,77	23,50
Zawartość substancji lotnych	28,91	25,16	22,01	25,58	22,81
Zawartość węgla	43,55	53,77	49,50	50,83	49,16
Analiza ostateczna					
Wilgotność właściwa	3,86	5,95	6,34	3,80	4,53
Zawartość popiołu	23,68	15,12	22,15	19,79	23,50
Zawartość węgla	58,21	64,83	56,71	63,00	58,19
Zawartość wodoru	3,75	3,70	2,99	3,82	3,25
Zawartość dwutlenku węgla	1,15	1,55	2,20	0,84	2,26
Kaloryczność (MJ/kg)	25,25	27,66	23,66	27,29	26,57
Zawartość kwarcu	9,00	2,70	4,30	10,00	7,00
Zawartość pirytu	1,50	1,50	0,00	0,00	0,50

Warunki zużycia w standardowej metodzie mają głównie charakter zużycia erozyjnego a nie ściernego; prędkość pomiędzy ziarnami minerału a ostrzem wynosi 15,4 m/s.

Zaproponowana metoda pozwala na dokładniejszą symulację warunków panujących w aktualnie używanych młynach przemysłowych. Nowa metoda umożliwia także szybkie i tanie określenie ścieralności w zależności od zadanych warunków (materiał poprzeczki, rodzaj minerału, naciski jednostkowe, temperatura, prędkość pomiędzy poprzeczką a warstwą ścinaną minerału). Wielkość próbki w nowej metodzie wynosi 30 g i jest znacznie mniejsza niż próbka w dotychczas stoso-

Tablica 2

Podstawowe mechaniczne własności pięciu wybranych rodzajów węgla

Własność węgla	Camden	Duvha	Grootvlei	Hendrina	Kriel
Twardość Vickersa (VH \perp)	21,4	23,8	18,5	21,5	18,2
Twardość Vickersa (VH \parallel)	17,2	19,9	17,8	17,2	16,2
Wytrzymałość na ściskanie \perp (MPa)	80,3	54,0	46,0	51,6	41,5
Wytrzymałość na ściskanie \parallel (MPa)	59,0	50,3	44,0	25,3	37,6
Wytrzymałość na uderzenie, ISI	78,4	75,6	71,3	73,7	67,9
Współczynnik rozdrobnienia ,IC	0,734	0,755	0,575	0,673	0,645
Wskaźnik W_i	1533	1532	2057	1888	1974
Współczynnik ścieralności AF (stal standardowa)	1547	340	283	586	395
Współczynnik ścieralności, AF (żeliwo)	135	38,6	43,2	79,7	56,5
Współczynnik intensywności ścieralności , IA (stal standardowa)	1300	284	163	391	251
Współczynnik intensywności ścieralności , IA (żeliwo)	99	32,3	22,6	49,1	34,4
Wytrzymałość na ścinanie (MPa)	2,304	2,176	1,689	2,096	1,978
Kohezja pozorną, C (MPa)	0,958	1,115	1,287	1,073	1,224
Kąt tarcia wewnętrznego ϕ	39,1	37,5	30,8	36,4	34,8

nej metodzie (2000 g). Metalowa poprzeczka jest mniejsza i łatwiejsza do wyprodukowania niż cztery ostrza stosowane w standardowej metodzie. Czas badania próbki za pomocą nowej metody wynosi około trzy minuty i jest krótszy niż w standardowej metodzie. Wskaźniki ścieralności (AF) i intensywności ścieralności (IA) mogą być wykorzystane do określenia odporności na zużycie, a w wyniku tego, trwałości elementów kruszących. Pozostałe wielkości wyznaczone za pomocą tej metody (IC , W_i , τ_p) mogą być użyte w obliczeniach projektowych lub eksploatacyjnych młynów i kruszarek.

Wskaźniki określające ścieralność (AF, IA) wyznaczone dla różnych materiałów konstrukcyjnych, osiągają znacząco różne wartości, dlatego też ścieralność minerałów powinna być badana przy użyciu poprzeczek wykonanych z takich materiałów, jakie są obecnie używane w młynach statycznych. Tylko rezultaty badań, które oddają warunki ruchowe i materiałowe, mogą być użyte wprost do obliczeń. Podczas testów ścieralności grubość zużywanej warstwy może być bardzo mała; pomiędzy testami na poprzeczce tworzy się cienka warstwa tlenku. W takich przypadkach rezultaty z testów obarczone są błędem, ponieważ wytworzona warstwa tlenków ma mniejszą odporność na zużycie ściernie od materiału rdzenia.

5. WPROWADZENIE DO ZJAWISKA ZUŻYCIA ŚCIERNEGO PODCZAS PROCESU MIELENIA

Zużycie ściernie jest głównym rodzajem zużycia w młynach. Taki rodzaj zużycia spowodowany jest przez twarde mineralne cząstki oraz charakteryzuje go brak oddziaływań adhezyjnych. Duży rozrzut kształtów i mechanicznych własności cząstek minerałów oraz różne warunki obciążeń młyna powodują zwiększenie rodzajów naprężeń na styku ciernym. Proces zużycia spowodowany jest pojedynczą albo powtarzalną akcją różnorodnych czynników (mikroskrawania, zmęczenie). Różnorodność rezultatów w trakcie badań procesu zużycia spowodowała konieczność wprowadzenia oraz rozróżniania terminologii określającej rodzaj zużycia ściernego - wysokonaprężeniowe, niskonaprężeniowe i erozyjne zużycie ściernie [8, 9].

Odporność kruszących elementów młynów na zużycie ściernie może być poprawiona przez odpowiednią konstrukcję, dobór najlepszych do tego celu materiałów oraz przez zastosowanie odpowiednich technologii wzmacniających wytrzymałość materiałów w żądanym przez nas kierunku.

Konsekwencją badań nad różnymi typami zużycia ściernego było zaprojektowanie różnego typu przyrządów służących do badania tego zjawiska [6, 19, 20,].

Pomimo że znany jest szereg przyrządów umożliwiających badanie zużycia ściernego, powstała potrzeba symulowania warunków występujących w młynach typu statycznego, czyli procesu jednoczesnego ścierania materiału konstrukcyjnego i rozdrabniania minerału. Procedura umożliwiająca badanie ww. ściernego zużycia za pomocą nowej metody została podana w pkt. 3.1. Metoda ta umożliwia przebadanie i sklasyfikowanie poprzeczek wykonanych z różnych materiałów w zależności od odporności na zużycie w warunkach kontaktu ściernego z określonym rodzajem kruszonego węgla.

5.1. Zestawienie wyników badań laboratoryjnych z wynikami uzyskanymi w przemyśle

Analizy procesu rozdrabniania w młynach typu statycznego pokazały, że względne przemieszczenie się warstw minerału w fali czołowej tworzonej przez toczącą się kulę jest głównym czynnikiem mającym wpływ na proces kruszenia [15]. Proces ten zachodzi w płaszczyznach ścinania warstw węgla (rys.4). Zużycie kruszących elementów (kule, stół) następuje głównie w wyniku ślizgania się zawartych w węglu twardych cząstek (kwarc, piryt), co powoduje powstanie bruzd i rys na powierzchniach tych elementów.

W wyniku porównania badań przeprowadzonych w laboratorium i w przemyśle dla pięciu rodzajów węgla uzyskano bardzo dobrą korelację pomiędzy tymi wynikami (tablica 3, rys. 7).

$$\text{MSL} = 27287 - 95,6 \text{ AF} \quad (r = -0,834)$$

$$\text{MSL} = 27064 - 137 \text{ IA} \quad (r = -0,923)$$

$$\text{ASL} = 20725 - 105 \text{ AF} \quad (r = -0,960)$$

$$\text{ASL} = 19976 - 140 \text{ IA} \quad (r = -0,988)$$

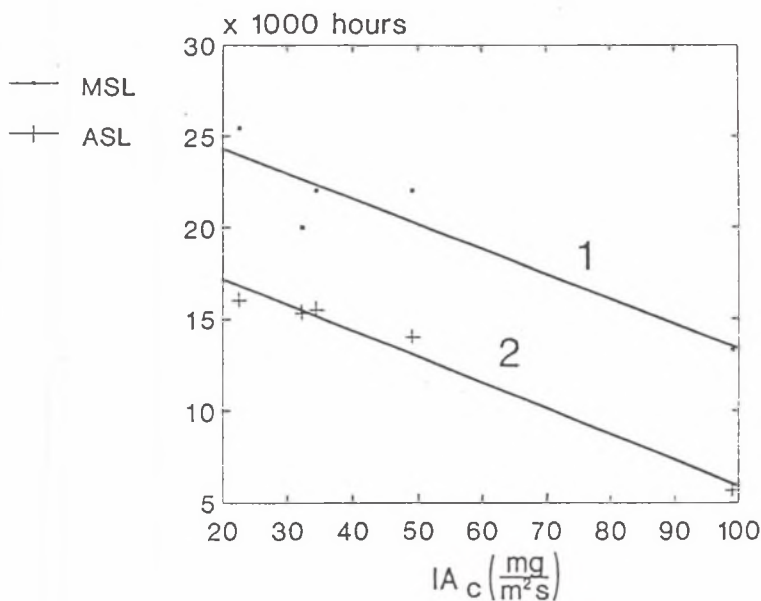
gdzie:

- r - współczynnik korelacji,
- MSL - maksymalna trwałość stołu (h),
- ASL - średnia trwałość stołu (h),
- AF - współczynnik ścieralności (mg kg^{-1}),
- IA - współczynnik intensywności ścieralności ($\text{mg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$).

Tablica 3

Porównanie trwałości elementów kruszących i ścieralności
wybranych węgli

L.p	Węgiel	MSL (h)	ASL (h)	AF (mg kg^{-1})	IA ($\text{mg m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
1	Camden	13260	5700	135,0	99,0
2	Duvha	20000	15300	38,6	32,3
3	Grootvlei	25435	16009	43,2	22,6
4	Hendrina	22000	14000	79,7	49,1
5	Kriel	22000	15500	56,5	34,4



Rys. 7. Wykres zależności pomiędzy IA_c i MSL oraz IA_c i ASL:

1 - prosta regresji z równania $MSL = 27064 - 137 IA_c$,

2 - prosta regresji z równania $ASL = 19976 - 140 IA_c$

Fig. 7. The correlation between IA_c and MSL and ASL:

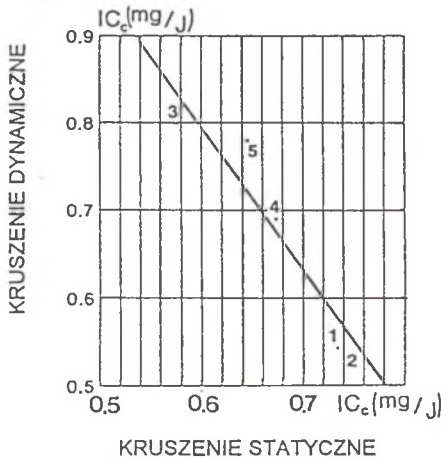
1 - the regression lines of the equations $MSL = 27064 - 137 IA_c$,

2 - the regression lines of the equations $ASL = 19976 - 140 IA_c$

5.2. Badanie zachowania się materiałów podczas udarowego kruszenia

Przeprowadzono serię doświadczeń na tej samej grupie węgla jak w poprzednich punktach, używając aparatury opisanej w rozdziale 3.2. Rezultaty tych doświadczeń przedstawiono na rysunkach 8 i 9.

Z przeprowadzonych testów wynika, że metody kruszenia udarowa i statyczna zależą od siebie odwrotnie proporcjonalnie - współczynnik korelacji wynosi (-0,983). Niska sprawność uzyskana przy kruszeniu węgla metodą gdzie głównym zjawiskiem fizycznym zachodzącym podczas procesu jest ścieranie można poprawić stosując udarową metodę kruszenia (zachodzi również zjawisko odwrotne). Z zależności określających IC dla ściernego i udarowego kruszenia wynika, że węgle pochodzące z kopalń Camden, Duvha powinny być kruszone w młynach typu statycznego, a węgle z kopalń Kriel, Gootvlei powinny być mielone w młynach udarowych.

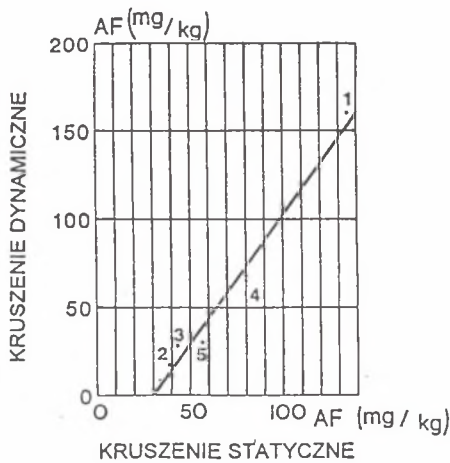


Rys. 8. Wykres zależności IC od systemu kruszenia podany dla pięciu węgli:

1- Camden, 2 - Duvha, 3 - Grootvlei, 4 - Hendrina, 5 - Kriel

Fig. 8. The correlation between the index of comminution (IC) in two different grinding systems for five coals:

1- Camden, 2 - Duvha, 3 - Grootvlei, 4 - Hendrina, 5 - Kriel



Rys. 9. Wykres zależności AF od systemu kruszenia podany dla pięciu węgli:

1- Camden, 2 - Duvha, 3 - Grootvlei, 4 - Hendrina, 5 - Kriel

Fig. 9. The correlation between the abrasion factor (AF) in two different grinding systems for five coals:

1- Camden, 2 - Duvha, 3 - Grootvlei, 4 - Hendrina, 5 - Kriel

6. WNIOSKI OGÓLNE

1. Zastosowany sprzęt (dwa typy aparatury) do badań procesu zużycia ściernego materiałów podczas kruszenia minerałów umożliwił symulację warunków panujących w młynach o działaniu statycznym i udarowym - badania zostały przeprowadzone dla pięciu węgli.
2. Procedura testowa może nie nadawać się w obecnej formie do powszechnego zastosowania, ale może stanowić punkt wyjścia do jej rozwinięcia.
3. Szerokie zastosowanie tej metody i odpowiednie opracowanie wyników może doprowadzić do określenia kierunków modyfikacji metody w celu jej ogólnego zastosowania.

4. Porównanie wyników doświadczeń z pomiarami przemysłowymi stwarza możliwość określenia korelacji pomiędzy czynnikami opisującymi ścieralność węgla zgodnymi z zaproponowaną metodą a maksymalną i średnią trwałością stołów w młynach typu statycznego.
5. Współczynniki AF i IA mogą być zastosowane do obliczeń trwałości elementów kruszących.
6. Nowy przyrząd może być wykorzystany do określenia ścieralności dowolnego minerału o charakterze ziarnistym i do określenia odporności na zużycie ściernie dowolnego elementu konstrukcyjnego.

LITERATURA

- [1] Millard D.j. ET AL.: 1953. The apparent strength of extensively cracked material. Proc. Physical Society, Section B, vol.68 s.1184
- [2] Berkowitz N.: 1979. An Introduction to Coal Technology. Academic Press, London, s.69-75
- [3] Van Krevelen D.W.: 1984. Coal. Typology-Chemistry-Physics-Construction. Elsevier, Amsterdam, s.127-141
- [4] Evans L. and Pomeroy G.: 1966. The Strength, Fracture and Workability of Coal. Pergamon, London, s.55-65
- [5] Rehbinder P.A. and Shchukin E.D.: 1973. Surface Phenomena in Solid during Deformation and Fracture Processes. Pergamon, London
- [6] Misra A. and Finnie I.: 1980. A classification of three-body abrasive wear and design of a new tester. Wear, vol.68 s.41
- [7] Raask E.: 1982. Trans. ASME, J.Eng. Power, vol.164 s.858
- [8] Lytle J.M. et al.: 1982. Am. Chem. Soc. Div. Fuel Chem., Prepr. 1982, vol.27 s.307
- [9] Rose H.E. and Sullivan, R.M. : 1958. Tube and Rod Mills. Constable, London, s.188
- [10] Austin L.G.: 1984. In: Handbook of Powder Science and Technology. Van Nostrand Reinhold, New York, NY, s.562-600
- [11] Ścieszka S.F.: 1987. Modeling durability of coal grinding systems. Wear, vol.114 s.29-30

- [12] Ścieszka S.F. 1985d. US Patent 669860
- [13] Halling F.J.: 1975. Principles of Tribology. Macmillan Press, London, s.117
- [14] Ścieszka S.F. 1985a. A technique to investigate pulverizing properties of coal. Powder Technol., vol.43 s.89-102
- [15] ASTM D409-71 "Standard Test Method for Grindability of coal by the Hardgrove - Machine Method", 1979
- [16] Ścieszka S.F. and Dutkiewicz R.K.: Testing abrasive wear in mineral comminution. International Journal of Mineral Processing, (1991) 32, s.81-109
- [17] Rose H.E. and Sullivan, R.M.:1961. Vibration Mills and Vibration Milling. Constable, London, s.107-141
- [18] Moore M.A.: 1974. A review of two-body abrasive wear. Wear, vol.27 s.1-17
- [19] Khrushov M.M.:1974. Principles of abrasive wear. Wear, vol.28 s.69-88
- [20] Rabinowicz E., Dunn L.A. and Russell P.G.: 1961. A study of abrasive wear under three-body condition. Wear, vol.4 s.345-355

Recenzent: Prof.dr hab.inż. **Karol REICH**

Wpłynęło do Redakcji w sierpniu 1994 r.

Abstract

The abrasiveness and grindability of minerals in sliding and impact contact with grinding elements during the comminution process have been studied with two experimental techniques. The equipment used has a wide pressure and velocity range and can be used to simulate the triboconditions inside pulverizers. A comparison has been made between industrial data and simulated tribo-testing. It shows a very good correlation