

Józef CZEPIEL

Instytut Maszyn i Urządzeń Energetycznych
Politechniki Śląskiej

BADANIA WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNYCH WĘGLA KAMIENNEGO^{x)} - DANE WEJŚCIOWE
DO MODELOWANIA PROCESU PRZEMIAŁU

Streszczenie. Przedstawiono wyniki pomiarów współczynników tarcia kinematycznego i statycznego po stali oraz współczynnika tarcia wewnętrznego węgla kamiennego zastosowanego w badaniach modelowych układu mielącego młyna pierścieniowo-kulowego. Opisano także: stanowisko pomiarowe, metodykę i wyniki badań quasi-statycznego miażdżenia warstwy węgla kamiennego o różnym składzie ziarnowym. Sprecyzowano warunki podobieństwa miażdżenia warstwy węgla przydatne do celów modelowania przemiału węgla w średniobieżnych układach mielących.

1. WSTĘP

Laboratoryjne badania właściwości fizycznych węgla kamiennego mają ścisły związek z podjętymi w Instytucie badaniami procesu przemiału w doświadczalnym młynie pierścieniowo-kulowym o skali półtechnicznej [5].

W celu doboru właściwych kryteriów modelowania procesu przemiału w średniobieżnych układach mielących konieczne było między innymi przeprowadzenie laboratoryjnych badań miażdżenia węgla oraz wyznaczenie wartości współczynników tarcia węgla kamiennego (o granulacji zastosowanej w modelowych badaniach młyna doświadczalnego) o stal i jego współczynnika tarcia wewnętrznego. W literaturze można znaleźć wartości współczynników tarcia dla węgla [1, 3], a także pewne informacje z zakresu kruszenia [2]. Dane te są jednak za mało dokładne na potrzeby modelowania przemiału i stąd wynika konieczność przeprowadzenia bardziej szczegółowych badań.

Do badań użyto różnych frakcji węgla kamiennego z Kopalni Zabrze-Makoszowy odsianych z sortymentu Dr III bądź uzyskiwanych poprzez mielenie w doświadczalnym układzie mielącym.

^{x)} Praca wykonana w ramach GPBP nr 02.13, kierunek 2, zad. 2.1.1.1.

Węgiel ten posiada następujące własności:

Wartość opałowa	$Q_w^r = 23000$ kJ/kg
Zawartość popiołu	$A^r = 25\%$
Zawartość wilgoci higroskopijnej	$W_h = 2\%$
Zawartość wilgoci przemijającej	$W_{ex} = 3,5\%$
Podatność przemiałowa	$G_{rH} = 63^0$

Skład popiołu:

Krzemionka jako SiO_2	44%
Żelazo jako Fe_2O_3	10%
Glin jako Al_2O_3	25%

Przedstawione wyniki badań dotyczą wprawdzie określonego rodzaju węgla kamiennego, ale mogą być również źródłem informacji o właściwościach innych materiałów kruchych.

2. WSPÓŁCZYNNIKI TARCIA WARSTWY WĘGLA O STAL

Pomiary statycznego k_s i kinematycznego k_k współczynnika tarcia wykonano stosując przyrząd w formie równi pochyłej o zmiennym kącie nachylenia α .

Schemat przyrządu przedstawia rys. 1.

Z warunków równowagi elementu warstwy węgla znajdującej się na równi pochyłej wynikają związki:

$$k_s = \operatorname{tg} \alpha_s \quad (1)$$

$$k_k = \operatorname{tg} \alpha_k \quad (2)$$

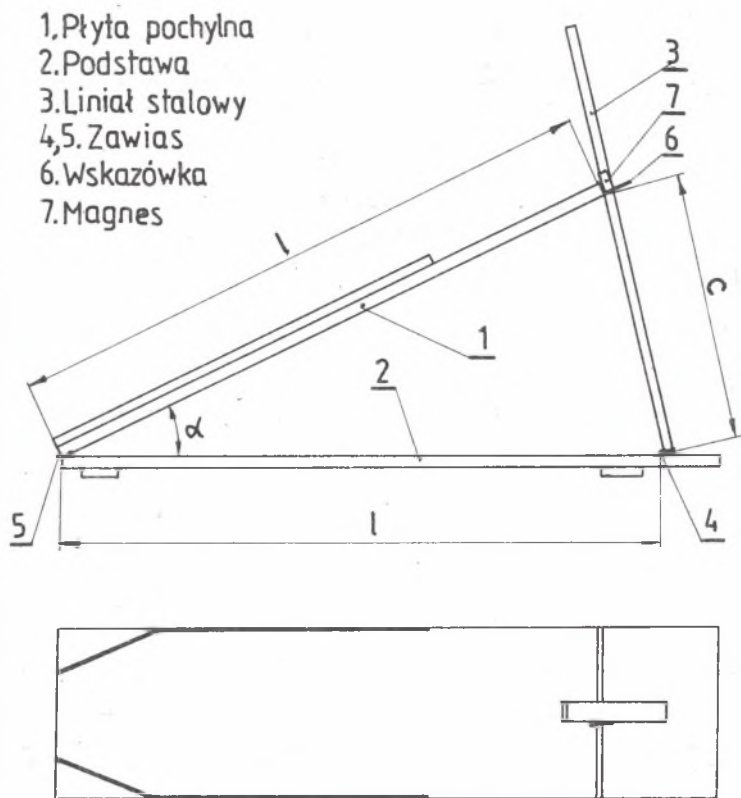
gdzie:

α_s, α_k odpowiednio, graniczny kąt tarcia spoczynkowego i kinematycznego.

Zarówno kinematyczny, jak i statyczny współczynnik tarcia dla węgla (materiału ziarnistego) zależy między innymi od jego wilgotności i granulacji, a także od tego, czy ruch odbywa się w warstwie innych cząstek, czy rozpatruje się ruch cząstki pojedynczej. Wykonano pomiary dla szerokich i wąskich klas ziarnowych węgla o różnej średniej średnicy ziarna.

2.1. Przyrząd pomiarowy i sposób wykonywania pomiarów

Pomiary wykonywano dla próbek węgla o masie 0,5 do 1 kg i uprzednio wyznaczonym składzie ziarnowym. Próbkę po wymieszaniu rozkładano w warstwie o grubości ok. 15 mm na końcu płyty 1. Następnie powoli unoszono płytę



Rys. 1. Przyrząd do pomiaru współczynników tarcia węgla po stali
Fig. 1. Instrument for measuring the coefficients of coal friction on steel

do położenia, w którym rozpoczynał się ruch warstwy, po czym obniżano do pozycji, w której węgiel poruszał się ruchem jednostajnym. Wymiar c_s , odpowiadający początkowi ruchu, był "zapamiętywany" przez przesuwający się po liniąle magnes, a wymiar c_k , odpowiadający wartości współczynnika tarcia kinematycznego, odczytywano wg położenia wskaźnika.

Celem zwiększenia dokładności pomiaru w danej serii były kilkunastokrotnie powtarzane (po każdym pomiarze węgiel mieszano celem ujednorodnienia jego składu ziarnowego).

Wartość współczynników tarcia wyliczano wg zależności:

$$k_s = \operatorname{tg}(2 \operatorname{ASN} \frac{c_s}{2l}) \quad (3)$$

$$k_k = \operatorname{tg}\left(2 \operatorname{ASN} \frac{c_k}{2l}\right) \quad (4)$$

gdzie l oznacza długość płyty pochylnej.

2.2. Wyniki pomiarów współczynników tarcia warstwy węgla po stali

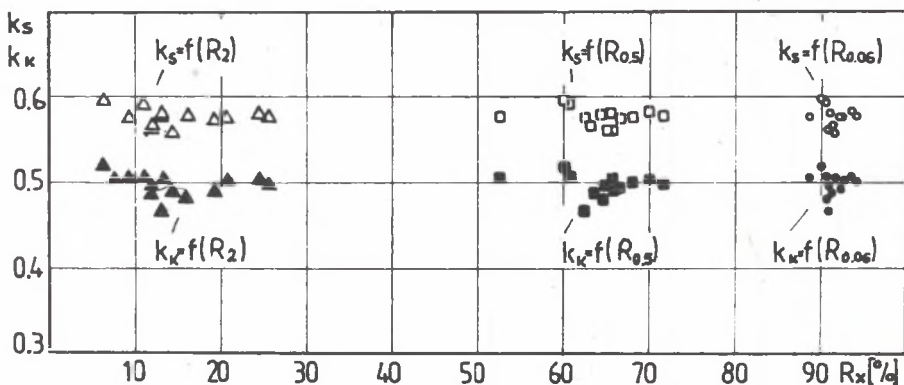
2.2.1. Klasy ziarnowe 0-7,5 mm

Wykonano 14 serii pomiarowych (średnia liczba pomiarów w serii wynosiła 15) dla 14 klas ziarnowych 0-7,5 mm o różnym składzie granulometrycznym i zbliżonej zawartości wilgoci. Praktycznie pokryty został cały zakres ziarnistości węgla, która wystąpiła podczas badań mielenia węgla w niewentylowanym układzie mielącym. Na wykresie tym pokazano zależności współczynnika tarcia kinematycznego i statycznego jako funkcję pozostałości sitowych: R_2 , $R_{0,5}$, $R_{0,06}$.

Z rozkładów punktów pomiarowych (rys. 2) wynika, że dla zbadanego zakresu ziarnistości współczynników k_s i k_k praktycznie nie zależą od składu węgla i wynoszą średnio:

$$k_k = 0,5 \quad k_s = 0,58$$

Stosunek wartości k_k/k_s jest w przybliżeniu stały i wynosi ok. 0.9.



Rys. 2. Zależność współczynników tarcia (kinematycznego i statycznego) o stal od składu ziarnowego polifrakcyjnej warstwy węgla kamiennego

Fig. 2. Dependence of the coefficients of friction (kinematic and static) on steel as a function of the size composition of a polyfraction layer of bituminous coal

2.2.2. Wąskie klasy ziarnowe

Wykonano pomiary dla następujących wąskich klas ziarnowych węgla (użytych z odsiewania produktów przemiału w młynie doświadczalnym):

0,25-0,5 mm

0,5-1 mm

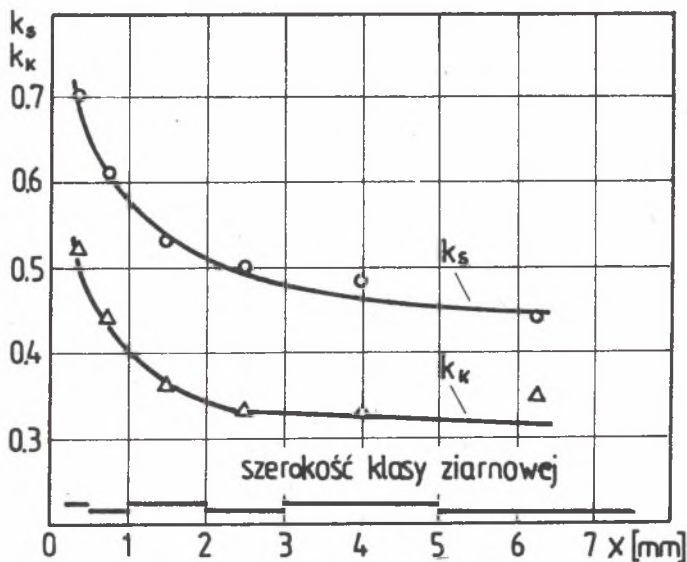
1-2 mm

2-3 mm

3-5 mm

5-7,5 mm

Uśrednione wyniki z poszczególnych serii pomiarowych przedstawiono na wykresie - rys. 3. Ilustruje on zależność współczynnika tarcia warstwy węgla od średniej arytmetycznej średnicy ziarna danej klasy ziarnowej.



Rys. 3. Zależność współczynników tarcia (kinematycznego i statycznego) o stal dla wąskich klas ziarnowych węgla kamiennego

Fig. 3. Dependence of the coefficients of friction (kinematic and static) on steel for narrow size grades of bituminous coal

2.2.3. Podsumowanie

Dla klas ziarnowych o średniej średnicy ziarna do ok. 2 mm wartości współczynników tarcia k_s i k_k silnie zależą od granulacji ziarn, natomiast dla ziarn grubszych zależność ta jest już bardzo słaba. O poziomie wartości współczynnika tarcia węgla decyduje głównie udział ziarn bardzo drobnych.

3. WSPÓŁCZYNNIK TARCIA WEWNĘTRZNEGO WĘGLA

Początkowo współczynnik tarcia wewnętrznego był mierzony za pomocą specjalnie w tym celu zbudowanego trybometru. Ze względu jednak na trudności pomiaru przy stosowaniu małych jednostkowych nacisków na warstwę (a taki warunek jest wymagany przez model) zrezygnowano z tej metody na korzyść metody opartej na pomiarze kąta wierzchołkowego swobodnie usypanego stożka węgla.

Rozpatrując stan równowagi cząstki znajdującej się na powierzchni stożka można napisać:

$$k_w = \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} \quad (5)$$

gdzie α - kąt wierzchołkowy stożka.

3.1. Przyrząd pomiarowy i sposób wykonywania pomiarów

Znając wymiar a (rys. 4) i odczytując w trakcie pomiaru wymiar l , można wyliczyć poszukiwaną wartość k_w zgodnie z zależnością:

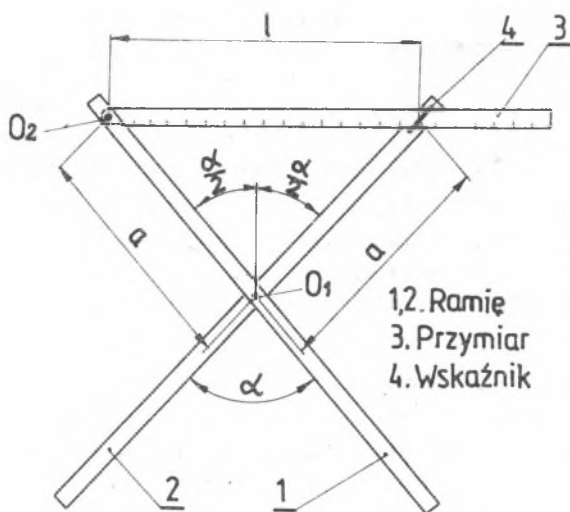
$$k_w = \sqrt{\left(\frac{2a}{l}\right)^2 - 1} \quad (6)$$

Wartości współczynnika k_w wyznaczono dla klasy ziarnowej węgla 0-7,5 mm.

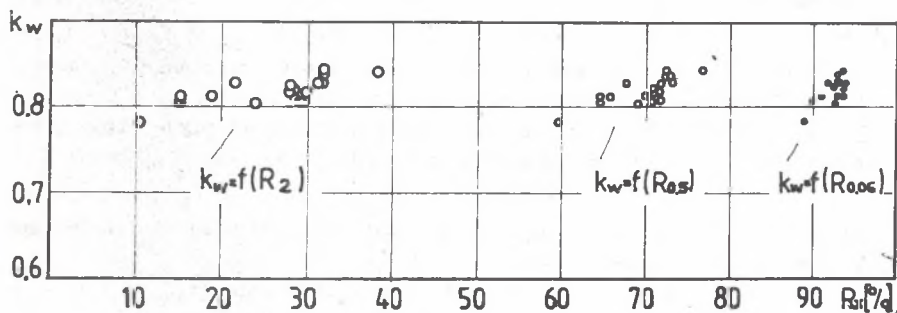
3.1.1. Wyniki pomiarów

Wyniki pomiarów przedstawiono w formie wykresowej na rys. 5. Na podstawie wykresu można dostrzec prawidłowość między wartością współczynnika tarcia wewnętrznego a granulacją poszczególnych klas ziarnowych 0-7,5 mm.

Im węgiel jest drobniejszy, tym wartość współczynnika tarcia wewnętrznego jest mniejsza. Niemniej, jak się wydaje, z wystarczającą dla potrzeb modelu dokładnością można przyjąć, że wartość średnia tego współczynnika jest stała i wynosi $k_w = 0,8$.



Rys. 4. Przyrząd do pomiaru kąta wierzchołkowego stożka węgla
 Fig. 4. Instrument for measuring the vertical angle of coal cone



Rys. 5. Zależność współczynnika tarcia wewnętrznego węgla od jego składu ziarnowego

Fig. 5. Dependence of the internal friction coefficient of coal on its size composition

4. BADANIA QUASI-STATYCZNEGO MIAŻDŻENIA WARSTWY WĘGLA

Badania quasi-statycznego miażdżenia warstwy węgla przeprowadzono na stanowisku doświadczalnym (p. 4.1), w którym próbka węgla była poddawana powolnemu miażdżeniu pomiędzy dnem cylindra a powierzchnią czołową tłoka. Celem badań było między innymi określenie wpływu:

- początkowej grubości warstwy f ,
- nacisku wywieranego na warstwę S ,
- składu granulometrycznego miażdżonego węgla

na:

- wartość efektu rozdrabniania ΔR_x ,
- odkształcenie warstwy miażdżonej ϵ .

Przez pojęcie efekt rozdrabniania ΔR_x [5] rozumie się:

$$\Delta R_x = R_{x1} - R_{x2} \quad (7)$$

gdzie:

R_{x1} , R_{x2} są to pozostałości sitowe na sicie o rozmiarze oczka x dla węgla przed i po miażdżeniu.

Wielkość ΔR_x fizycznie oznacza przyrost masy produktu (pyłu) klasy ziarnowej 0-x z jednostki masy węgla powstały w wyniku miażdżenia.

Badania przeprowadzono dla wąskich klas ziarnowych węgla wyszczególnionych w p. 2 przygotowanych dwoma sposobami, tj.:

- przez odsiewanie na sitach laboratoryjnych produktu przemiału klasy ziarnowej 0-7,5 mm z doświadczalnego układu mielącego,
- przez odsiewanie na sitach laboratoryjnych nadawy do młyna klasy ziarnowej 0-7,5 mm (sposób uzyskania próbek do badań, jak się okazało, wpływa na poziom wartości wyników),

oraz szerokiej klasy ziarnowej 0-2 mm (zastosowanej później w badaniach przemiału w młynie doświadczalnym).

Skład przeciętny tej klasy ziarnowej jest następujący:

$$R_{0,06} = 90,4\% \quad R_{0,5} = 59,5\%$$

$$R_{0,09} = 88,0\% \quad R_1 = 27,8\%$$

$$R_{0,15} = 83,4\% \quad R_2 = 0,9\%$$

$$R_{0,25} = 74,5\%$$

Miażdżenia wykonywano dla różnych kombinacji początkowych grubości warstwy (mas próbek) i różnej wartości końcowego nacisku wywieranego na warstwę.

4.1. Stanowisko pomiarowe i metodyka pomiarów

Schemat stanowiska pomiarowego zamieszczono na rys. 6.

Próbki węgla miażdżone są między czołową powierzchnią tłoka 10 a dnem cylindra 3. Siła wywierana jest przez siłownik hydrauliczny 4 na dno cylindra pomiarowego. Tłok przyrządu oddziałuje na sprężynowy siłomierz laboratoryjny 2. Wartość siły wskazywana jest przez czujnik zegarowy 6. Do pomiaru grubości warstwy węgla przed cyklem miażdżenia f (grubości warstwy swobodnie usypanej) używa się czujnika zegarowego 7, umocowanego w statywie 9. Zerowania czujnika zegarowego 5, mierzącego ubytek grubości warstwy, dokonuje się śrubą regulacyjną 8.

Odważoną na wadze laboratoryjnej próbkę węgla wysypuje się do cylindra i równomiernie rozproszcza na jego dnie, po czym delikatnie wprowadza tłok i mierzy czujnikiem 7 grubość warstwy f , obciążonej jedynie ciężarem tłoka (w niektórych przypadkach warstwa była lekko wstępnie ubijana - patrz p. 4.2), oraz zeruje wskazania czujnika 5. Następnie cylinder wraz z tłokiem ustawia się na siłowniku i obciąża do zaplanowanego poziomu. Celem zwiększenia dokładności pomiaru wykonuje się od kilku do kilkunastu cykli pomiarowych.

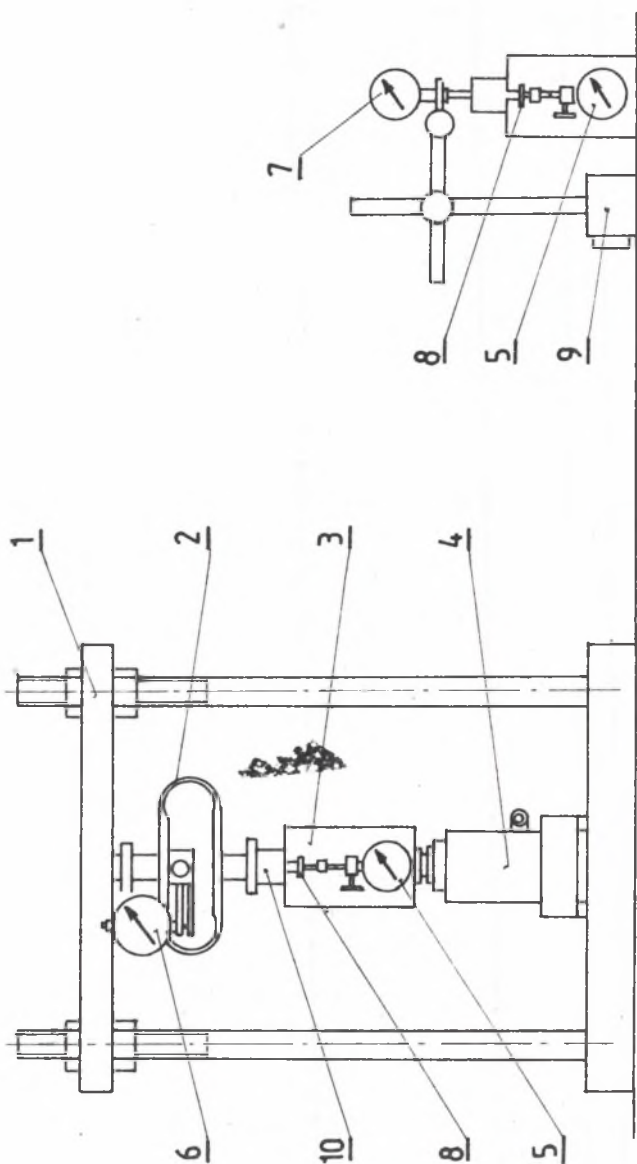
Po zmiażdżeniu wykonuje się analizę sitową próbek przez sита laboratoryjne o rozmiarze oczek: 0,06, 0,09, 0,15, 0,25, 0,5, 1, 2, 5 mm, wykorzystując w zależności od potrzeb całość bądź część kompletu sit.

4.2. Analiza wyników pomiarów

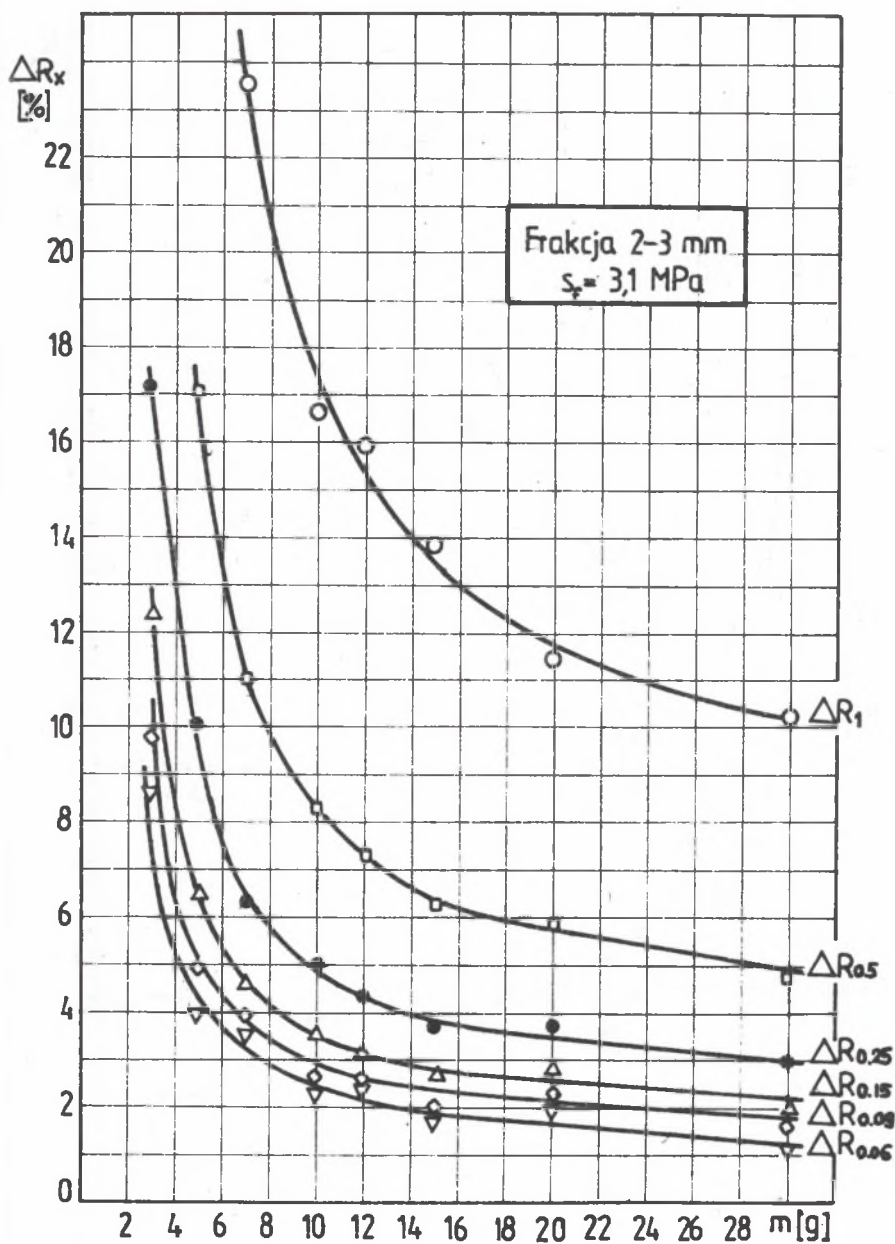
Ważniejsze wyniki pomiarów zamieszczono w formie wykresów na rysunku 7-14.

4.2.1. W z g l ę d n e o d k s z t a ł c e n i e w a r s t w y j a k o f u n k c j a n a c i s k u

Przykładowy wykres maksymalnych odkształceń warstwy ϵ_k jako funkcję masy miażdżonej próbki m pokazano na rys. 8. Na rysunku tym zamieszczono również wykres zależności grubości warstwy przed miażdżeniem f i po miażdżeniu f_k , wykresy gęstości pozornej warstwy w stanie początkowym p i warstwy po miażdżeniu p_k , a także efektów rozdrabniania $\Delta R_{0,15}$ i $\Delta R_{0,25}$ od masy próbki m klasy ziarnowej (frakcji) 1-2 mm. Podobnie, lecz z dodatkowym uwzględnieniem większej liczby efektów rozdrabniania (rysunek 7) zostały opracowane pomiary dla wszystkich 6 klas ziarnowych. Charakter uzyskanych zależności jest taki sam jak zobrazowany na przykładowych wykresach (rys. 7 i 8). We wszystkich tych przypadkach miażdżenie prowadzono po wstępnym zagęszczeniu (lekkim ubiciu) warstwy węgla przy zastosowaniu maksymalnego nacisku $s_f = 3,1$ MPa. W podobnych warunkach,

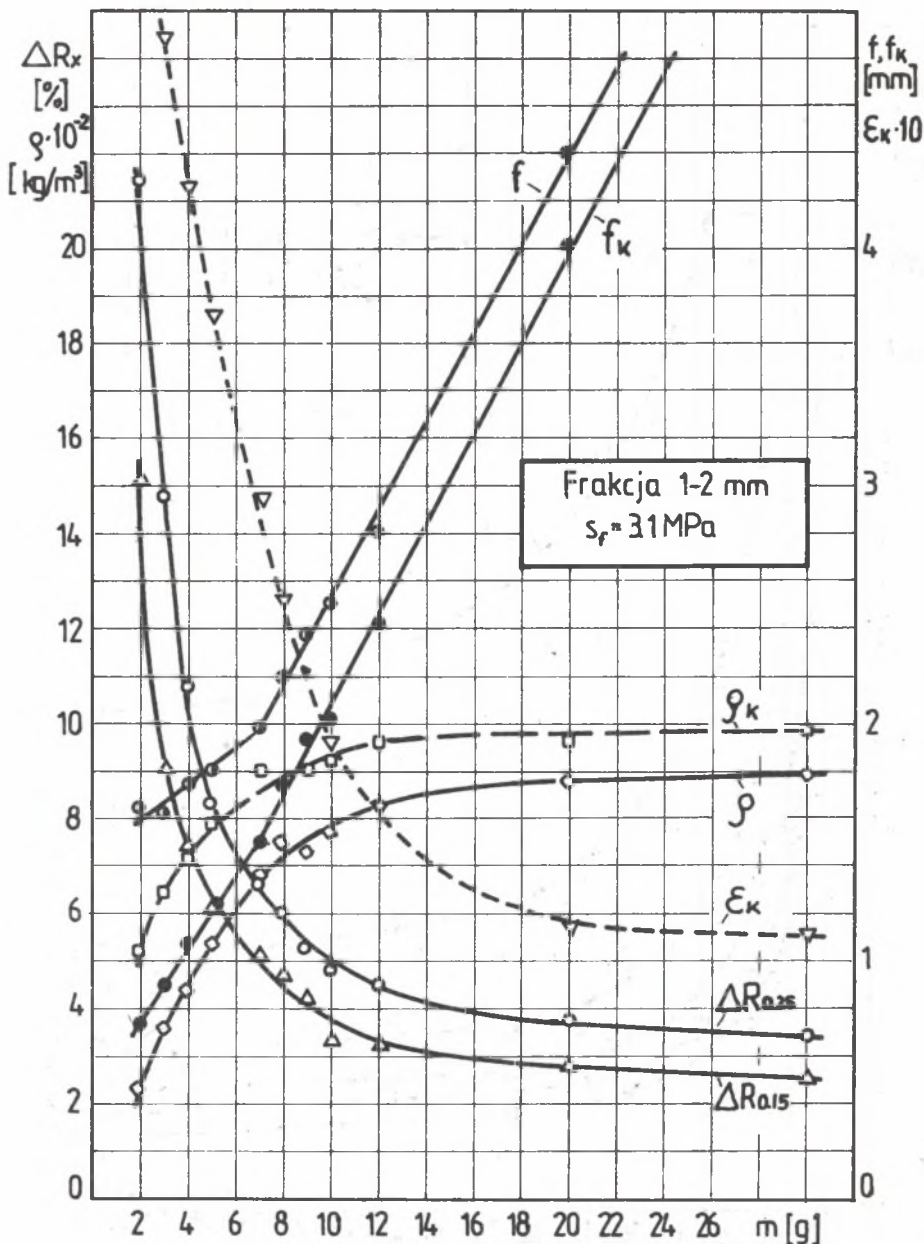


Rys. 6. Schemat stanowiska pomiarowego do badań miążdżenia węgla
 Fig. 6. Diagram of the measuring position for the tests of coal crushing

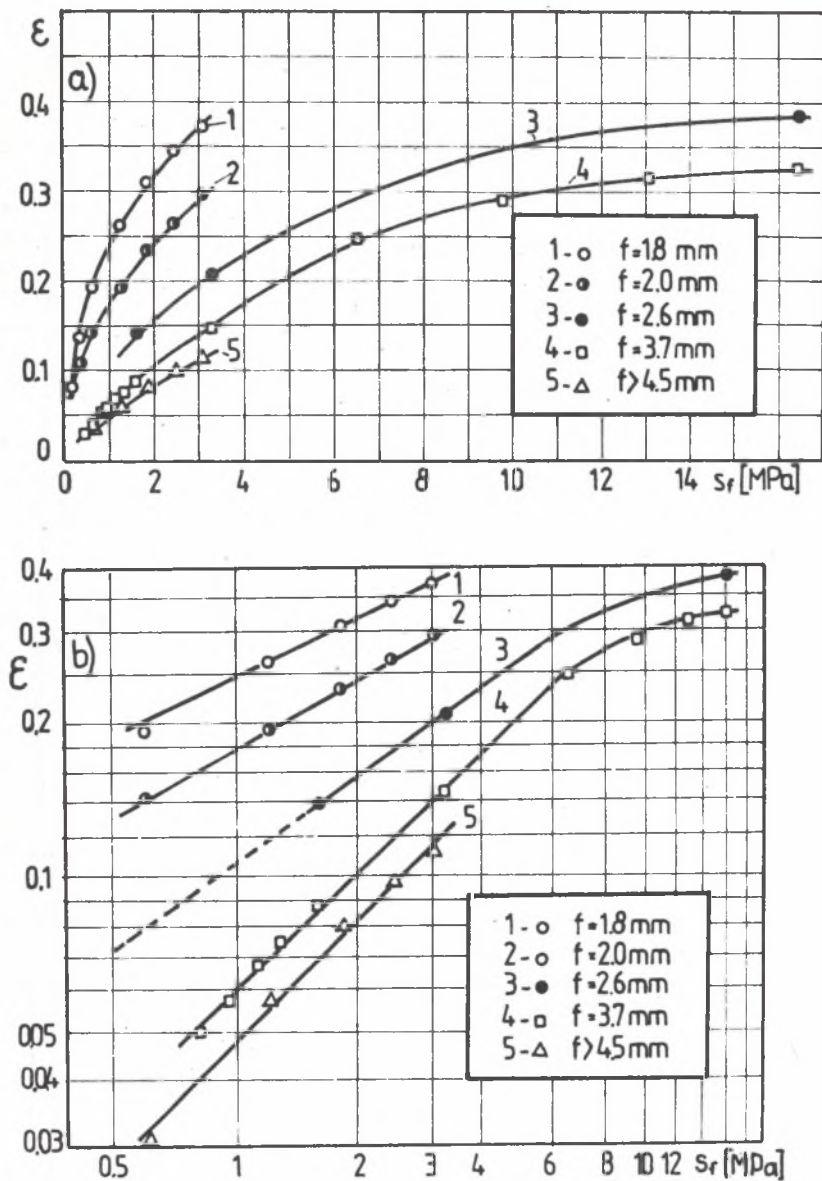


Rys. 7. Wyniki miłdżenia warstwy węgla klasy ziarnowej 2-3 mm

Fig. 7. Results of crushing of a layer of 2-3 mm size grade coal



Rys. 8. Wyniki miażdżenia warstwy węgla klasy ziarnowej 1-2 mm
 Fig. 8. Results of crushing of a layer of 1-2 mm size grade coal



Rys. 9. Zależność względnego odkształcenia warstwy węgla klasy ziarnowej 1-2 mm od nacisku jednostkowego

a) podziałka liniowa, b) podziałka podwójnie logarytmiczna

Fig. 9. Dependence of the relative deformation of a 1-2 mm size grade coal layer on the unit pressure

a) linear scale, b) double logarithmic scale

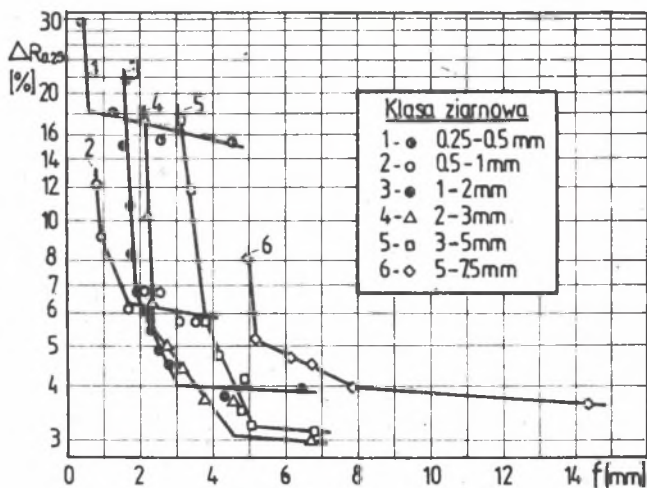
lecz przy znacznie rozszerzonym zakresie nacisków przeprowadzono pomiary, których częściowe wyniki ilustruje rys. 9. Na rysunku tym przedstawiono zależność $\mathcal{E} = f(s_f)$ przy $f = \text{idem}$ zasadniczo dla warstw grubych ($f > 2x_{sr}$, gdzie x_{sr} oznacza średnią asymetryczną średnicę ziarn danej klasy) klasy ziarnowej 1-2 mm, uzyskanej z odsiewania nadawy do młyna klasy 0-2 mm. Z przebiegu zależności widać, że w zakresie do ok. 6 MPa odkształcenie warstwy jest potęgową funkcją nacisku, a dla nacisków wyższych warstwa "umacnia się". Występująca tendencję do stabilizacji można wyjaśnić tym, że obliczona pozorna gęstość węgla w odkształconej warstwie osiąga wartości bliskie rzeczywistej gęstości węgla, a więc dalsze jej odkształcanie podlega innym prawom fizycznym. Przykładowo, jeżeli wyznaczona rzeczywista gęstość frakcji 1-2 mm wynosi ok. 1300 kg/m^3 , to gęstość obliczona dla $f_0 = 3,7 \text{ mm}$ i $s_f = 16,4 \text{ MPa}$ wynosi ok. 1290 kg/m^3 , a dla $f_0 = 2,6 \text{ mm}$ przy takim samym nacisku gęstość obliczeniowa wynosi około 1303 kg/m^3 .

4.2.2. Efekt rozdrabniania miążdżonej warstwy węgla

Na rys. 7 pokazano przykładową zależność efektów rozdrabniania ($\Delta R_{0,06}$ do ΔR_1) dla węgla klasy ziarnowej 2-3 mm, na rys. 8 i rys. 12 zależności $\Delta R_{0,15}$ i $\Delta R_{0,25}$ dla klasy ziarnowej 1-2 mm, natomiast rys. 13 przedstawia zależność $\Delta R_{0,15} = f(s_f)$ uzyskaną dla klasy ziarnowej 0-2 mm. Z analizy przebiegów widać, że efekt rozdrabniania jest potęgową funkcją nacisku (naprężenia) w pewnym na ogół szerszym niż dla zależności $\mathcal{E} = f(s_f)$ zakresie nacisków.

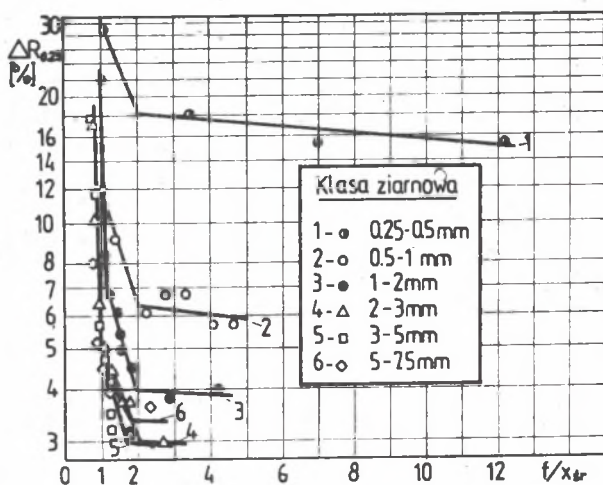
Drugi istotny wniosek to, że dla warstw cienkich ($f/x_{sr} < 2$) efekt rozdrabniania wyraźnie zależy od stosunku f/x_{sr} (rys. 11), natomiast dla warstw grubych można z dobrym przybliżeniem przyjąć, że efekt rozdrabniania przy jednakowych naciskach nie zależy już od grubości warstwy, w której miążdżenie zachodzi. Dotyczy to zarówno wąskich klas ziarnowych węgla, jak i klasy 0-2 mm (rys. 13 i 14).

Wniosek ten ma duże znaczenie dla modelowania procesu przemiału, bowiem jego spełnienie gwarantuje w przybliżeniu samomodelujący się proces rozdrabniania w średniobieżnym układzie mielącym.



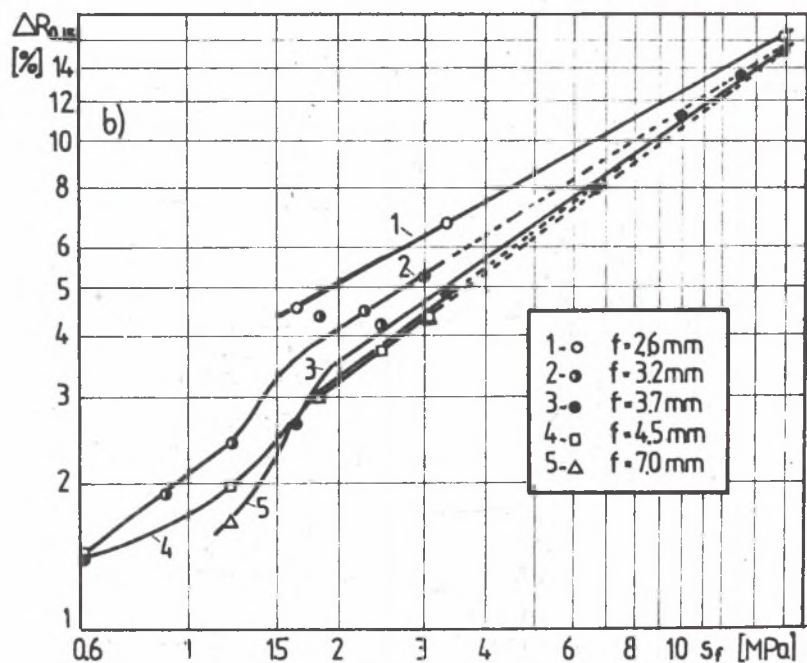
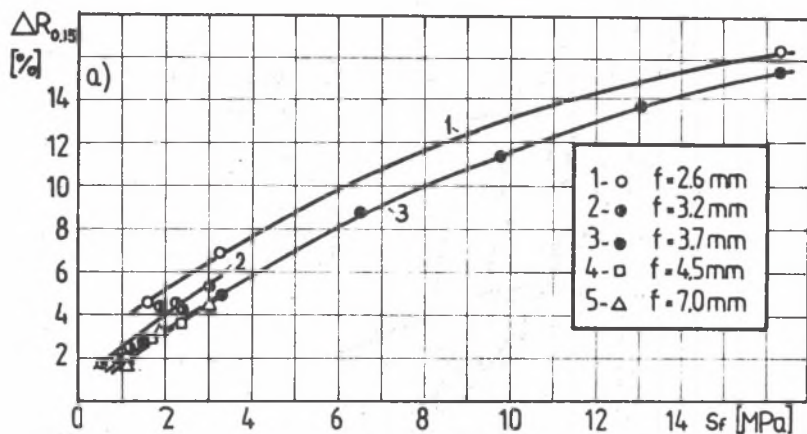
Rys. 10. Zależność efektu rozdrabniania $\Delta R_{0,25}$ od początkowej grubości warstwy dla wąskich klas ziarnowych węgla

Fig. 10. Dependence of $\Delta R_{0,25}$ grinding effect on the initial thickness for narrow size grades of coal



Rys. 11. Zależność efektu rozdrabniania $\Delta R_{0,25}$ od stosunku początkowej grubości warstwy do średniej średnicy ziarna dla wąskich klas ziarnowych węgla

Fig. 11. Dependence of $\Delta R_{0,25}$ grinding effect on the initial layer thickness mean grain diameter ratio for narrow size grades of coal

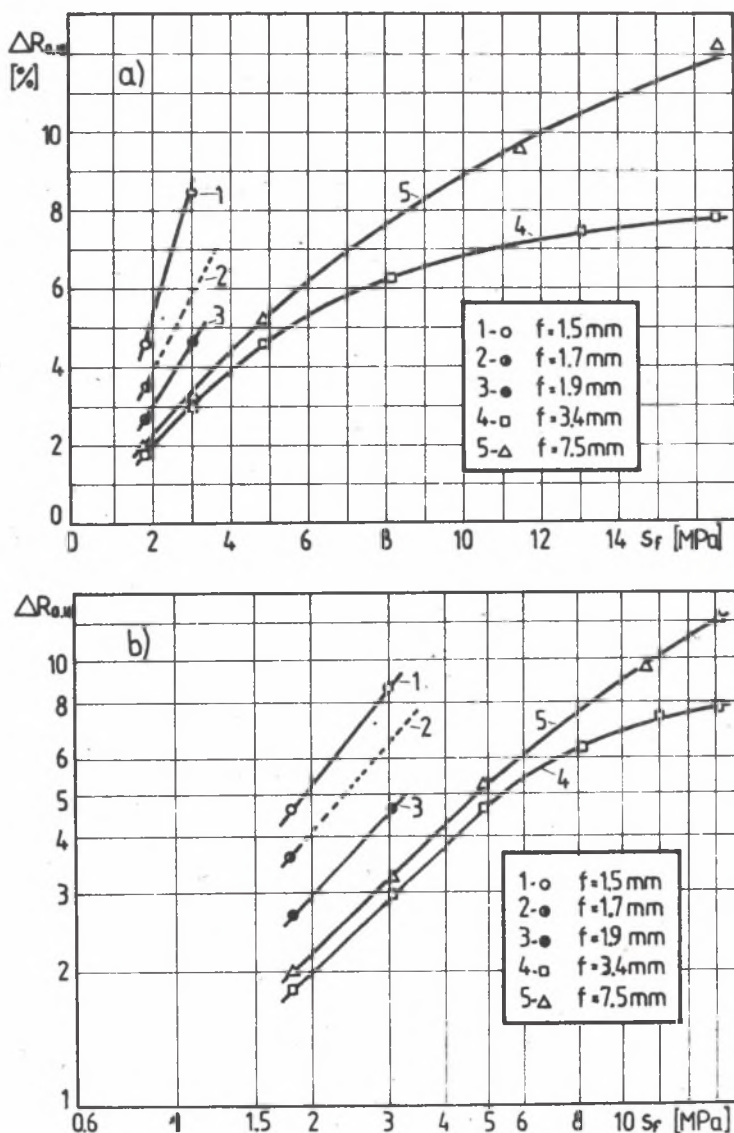


Rys. 12. Zależność efektu rozdrabniania $\Delta R_{0,15}$ od nacisku jednostkowego wywieranego na warstwę węgla klasy ziarnowej 1-2 mm

a) podziałka liniowa, b) podziałka podwójnie logarytmiczna

Fig. 12. Dependence of $\Delta R_{0,15}$ grinding effect on the unit pressure exerted on a 1-2 mm size grade coal layer

a) linear scale, b) double logarithmic scale

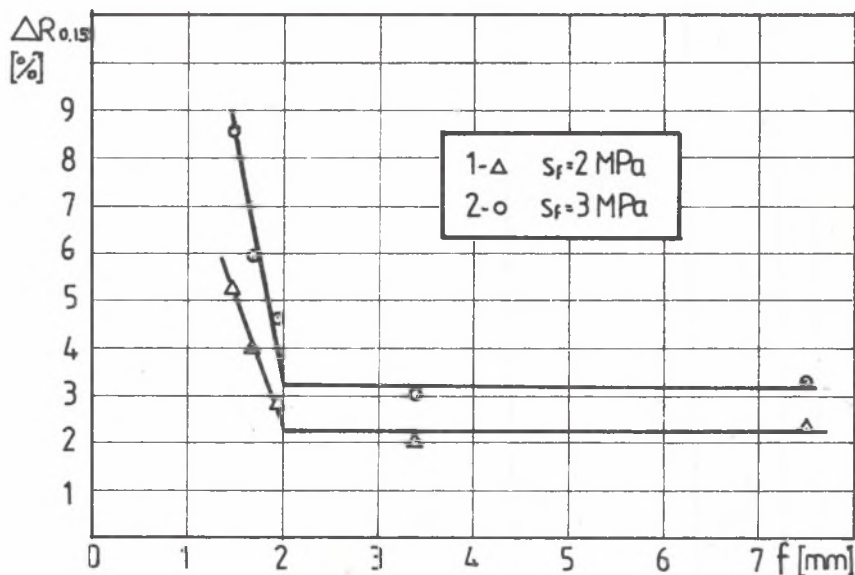


Rys. 13. Zależność efektu rozdrabniania $\Delta R_{0,15}$ od nacisku jednostkowego wywieranego na warstwę węgla klasy ziarnowej 0-2 mm

a) podziałka liniowa, b) podziałka podwójnie logarytmiczna

Fig. 13. Dependence of $\Delta R_{0,15}$ grinding effect on the unit pressure exerted on a 0-2 mm size grade coal layer

a) linear scale, b) double logarithmic scale



Rys. 14. Zależność efektu roszarpiwania $\Delta R_{0,15}$ od nacisku jednostkowego wywieranego na warstwę węgla klasy ziarnowej 0-2 mm

Fig. 14. Dependence of $\Delta R_{0,15}$ grinding effect on the unit pressure exerted on a 0-2 mm size grade coal layer

LITERATURA

- [1] Mielecki B.: Wiedomości o badaniu i własnościach węgla. Wydawnictwo "Śląsk", Katowice 1971.
- [2] Hodorow G.S.: Fizyka izmierzenijs. "Nauka", Moskwa 1972.
- [3] Goździcki M., Świątkiewicz H.: Przemysłniki, WIT, Warszawa 1979.
- [4] Jagupow A.W., Wyskubieniec A.S.: O koeficientie wewnętrznego tarcia w wielkoziarnistom ugle, Tsepłoenegotika 1990 nr 4.
- [5] Czepiel J., Mroczek K.: Badania modelowe układu mielącego młyna pierścieniowo-kulowego. I. Przyjęte założenia, opis stanowiska doświadczalnego, metodyka badań, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria Energetyka, Gliwice 1988.

ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КАМЕННОГО УГЛЯ - ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ
ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПЕРЕМОЛА

Р е з ю м е

В работе представлены результаты измерений коэффициентов кинематического и статического трения по стали а также коэффициента внутреннего трения каменного угля, примененного в модельных исследованиях перемалывающей системы кольцево-шаровой мельницы. Описаны также: измерительный стенд, методика и результаты исследований квазистатического дробления слоя каменного угля с различной размерностью зерна. Доопределены условия подобия дробления слоя угля пригодны для целей моделирования угля в среднебеговых перемалывающих системах.

TESTS OF PHYSICAL PROPERTIES OF BITUMINOUS COAL - INPUT DATA FOR
GRINDING PROCESS MODELLING

З и м а г у

The results of measurements of static and kinematic friction coefficients on steel, and the coefficient of bituminous coal internal friction applied in model testing of the grinding system of a ring-ball mill have been presented.

The author also described the measuring position, methodology and results of quasistatic crushing of a bituminous coal layer with different size composition.

Similarity conditions of crushing of a bituminous coal layer suitable for modelling of coal grindig in medium speed grinding systems.