Andrzej ZNISZCZYŃSKI

ODSPAJANIE WIĘKSZYCH BRYŁ SKALNYCH W PROCESIE URABIANIA

SEPARATION OF BIGGER ROCKY LUMPS IN PROCESS OF MINING

W artykule zaprezentowano wyniki rozważań teoretycznych wpływu geometrii pracy narzędzi ostrokrawędziowych na odspajanie większych brył skalnych. Wskazano na korzyści płynące z odspajania przez rozerwanie skały, określono krzywiznę takich odspojeń i czynniki im sprzyjające.

In the article results of theoretical considerations of the influence geometry of sharp-edged tools on separation bigger rocky lumps are presented. The article points benefits from separation by tearing rocks and defines curvature of those separations and factors which promote them.

1. Wstęp

W dobie rozwoju mechanizacji górnictwa i postępującej z nią degradacji urobku problemem pierwszoplanowym staje się poprawa sortymentu urobku i związane z nią zmniejszenie energochłonności urabiania skał. W celu technicznego rozwiązania powyższego problemu zaistniała konieczność opisu teoretycznego procesu niszczenia spójności skał w trakcie urabiania, a w szczególności procesu odspajania większych brył skalnych. Bogata literatura dotycząca powyższych zagadnień zawiera liczne teorie, takie jak: Evansa [4], Bierona [1], Kasjana [6], Frołowa [5], Nishimatsu [7], Bocsańczrego [2]. Posiadają one jednak szereg rozbieżności, a po części empiryczny charakter niektórych z nich sprawia, że są one słuszne tylko dla określonych warunków oddziaływania narzędzia i określonych skał.

W artykule zaprezentowano wyniki badań analitycznych wpływu geometrii pracy narzędzi ostrokrawędziowych na odspajanie większych brył skalnych.

2. Dwie fazy elementarnego cyklu urabiania

Przy urabianiu mechanicznym narzędzie o kształcie najczęściej klinowym oddziałuje na skałę naciskiem. Mechanizm niszczenia skały przy takim działaniu jest różny. Skała może być miażdżona, ścinana bądź rozrywana. Niszczenie spójności skały poprzez miażdżenie wymaga znacznych sił oddziaływania narzędzia, pochłania duże ilości energii i prowadzi do znacznego rozdrobnienia urobku. Przy urabianiu dąży się więc głównie do niszczenia spójności skał poprzez rozerwanie lub ścięcie. Aby to osiągnąć potrzebne jest wytworzenie odpowiedniego stanu naprężenia w skale. Przyglądając się różnym sposobom urabiania mechanicznego i występującym w nich sposobom niszczenia spójności skały, można zauważyć cykliczność procesu urabiania i wyodrębnić w nim podstawowy elementarny cykl. W jednym elementarnym cyklu urabiania można wyróżnić dwie fazy:

- fazę wstępną, przygotowawczą w której narzędzie wypracowuje sobie warunki do przekazanie na skałę odpowiednich sił niezbędnych do zainicjowania zasadniczego odspojenia i
- fazę drugą zasadniczą, w której wywarte przez narzędzie naciski powodują odspojenie większego odłamka skały, stanowiącego w efekcie podstawowy urobek.

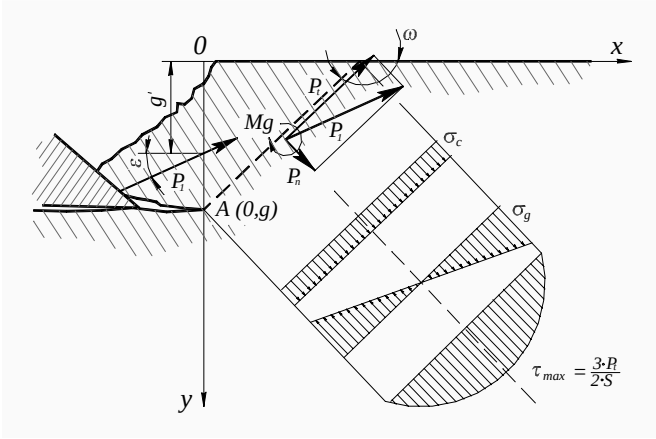
W obydwu fazach następuje niszczenie spójności skały, przy czym w fazie pierwszej następuje miażdżenie skały i powstanie spękań wewnętrznych. Faza ta przebiega do momentu, gdy wytworzony w skale stan naprężenia spowoduje ukierunkowanie się procesu dezintegracji w stronę odsłoniętej powierzchni skały. Rozpoczyna się wtedy druga faza elementarnego urabiania, prowadząca do odspojenia większej bryły skalnej. Odspojenie następuje na skutek ścięcia lub rozerwania skały.

Ponieważ wytrzymałość skały na rozerwanie jest mniejsza niż na ścinanie, należałoby tak kierować procesem urabiania, aby w drugiej fazie elementarnego cyklu urabiania uzyskiwać odspojenia na skutek przekroczenia wytrzymałości skały na rozrywanie. Dla określenia warunków sprzyjających takiemu urabianiu przeprowadzono analizę teoretyczna wytężenia skały w II fazie elementarnego urabiania

3. Analiza stanu wytężenia skały w i fazie elementarnego urabiania

Dla celów analizy obrano przykład oddziaływania narzędzia w elementarnym skrawie i poczyniono następujące założenia.:

- na odspajany odłamek skalny działa siła skupiona P_1 pod kątem $\boldsymbol{\varepsilon}$ do odsłoniętej powierzchni przyłożona w odległości g' od niej (Rys.1.),



Rys. 1. Rozkład naprężeń w rozpatrywanej płaszczyźnie

- szerokość narzędzia jest na tyle duża, że pomijalne są naprężenia w kierunku równoległym do długości ostrza,
- ośrodek skalny jest ośrodkiem izotropowym,
- podcięcie przez strefę sprasowania, czy też szczelinę wyprzedzającą pozwala na przyrównanie występu skalnego do belki wspornikowej obciążonej siłą skupioną.

Przy tak. przyjętych założeniach rozkład naprężeń w płaszczyźnie potencjalnego wytężenia, biegnącej z wierzchołka strefy sprasowania, czy też szczeliny wyprzedzającej, w kierunku odsłoniętej powierzchni skały (Rys.1) podobny jest do rozkładu naprężeń w belce o przekroju prostokątnym poddanej zginaniu i ścinaniu [9].

Maksymalne naprężenia rozrywające wypadają na skraju rozpatrywanego przekroju od strony ostrza narzędzia (punkt A rys.1) i wynoszą

$$\sigma_{r0} = \frac{2 \cdot P_1}{b \cdot g} \cdot [(1 - 3 \cdot \frac{g'}{g}) \cdot \cos\varepsilon \cdot \sin^2\omega - \sin\varepsilon \sin 2\omega] \tag{1}$$

Miejsce maksymalnych naprężeń stycznych opisanych wzorem

$$\tau_{\max} = -\frac{3}{2} \cdot \frac{P_1}{b \cdot g} \cdot \cos(\omega + \varepsilon) \cdot \sin\omega \tag{2}$$

wypada w środku przekroju. W tym też miejscu naprężenia ściskające osiągają wartość

$$\sigma_c = \frac{P_1}{g \cdot b} \cdot \sin(\varepsilon + \omega) \cdot \sin\omega \tag{3}$$

Przyjmując, że odspojenie może nastąpić poprzez ścięcie lub rozerwanie skały, przeanalizowano każdą z tych możliwości z osobna.

a) Odspojenie na skutek przekroczenia wytrzymałości na ścinanie

Według kryterium wytężeniowego Coulomba-Mohra proces ścinania rozpocznie się gdy naprężenia ścinające osiągną wartość

$$\tau_z = \tau_{\max} - tg\phi \cdot \sigma_c = c \tag{4}$$

Podstawiając z (2) i (3) odpowiednie wyrażenia i wprowadzając pewne uproszczenie polegające na pominięciu współczynnika 3/2 (zakłada się równomierny rozkład naprężeń ścinających w całej płaszczyźnie - uproszczenie to jest dopuszczalne ze względu na niewielkie ramię działania siły P_1 względem środka rozpatrywanej płaszczyzny) otrzymuje się

$$\tau_z = -\frac{P_1}{b \cdot g} \cdot [\cos(\varepsilon + \omega) \cdot \sin\omega + \sin(\varepsilon + \omega) \cdot \sin\omega \cdot tg\phi] \tag{5}$$

Przyrównując $\tau_z'(\omega)$ do zera otrzymuje się wyrażenie na wartość kąta ścięcia

$$\omega_\tau = \frac{\frac{3}{2}\pi + \phi - \varepsilon}{2} \tag{6}$$

Ponieważ proces ścinania z poślizgiem rozpoczyna się gdy τ_z=c, z zależności (5) i (6) można wyznaczyć wartość siły $P_{1\tau}$, która zainicjuje ścięcie:

$$P_{1\tau} = \frac{2 \cdot c \cdot b \cdot g \cdot \cos\phi}{1 - \sin(\phi - \varepsilon)} \tag{7}$$

(Do podobnej zależności, ale inna drogą doszedł i przedstawił ją w literaturze Nishimatsu [7]).

Względna siła odspajania przy ścinaniu wyrazi się więc wzorem

$$k_{p0} = \frac{P_1}{c \cdot b \cdot g} = \frac{2 \cdot \cos\phi}{1 - \sin(\phi - \varepsilon)} \tag{8}$$

Jej zależność od kąta oddziaływania narzędzia przedstawia wykres (Rys.2a). Ścięcie naroża skały nastąpi wzdłuż linii prostej.

b) Odspojenie na skutek przekroczenia wytrzymałości na rozrywanie

Zakładając, że odspojenie rozpocznie się na skutek przekroczenia wytrzymałości skały na rozrywanie pęknięcie odspajające rozpocznie się w punkcie A, w którym naprężenia rozciągające osiągają największa wartość. Naprężenia styczne w tym punkcie zgodnie z przyjętym modelem belki wspornikowej równe są zeru. Kryteria wytężeniowe dla takiego przypadku sprowadzają się do warunku: $\sigma_r = R$. Pęknięcie zostanie zapoczątkowane w płaszczyźnie dla której wartość naprężeń rozciągających osiągnie ekstremum, a więc gdy $\sigma_r'(\omega)$=0. Z powyższego i zależności (1) można określić kąt zapoczątkowania odspojenia (9), a także siłę zapoczątkowującą odspojenie (10) i względną siłę zapoczątkowującą odspajanie (11).

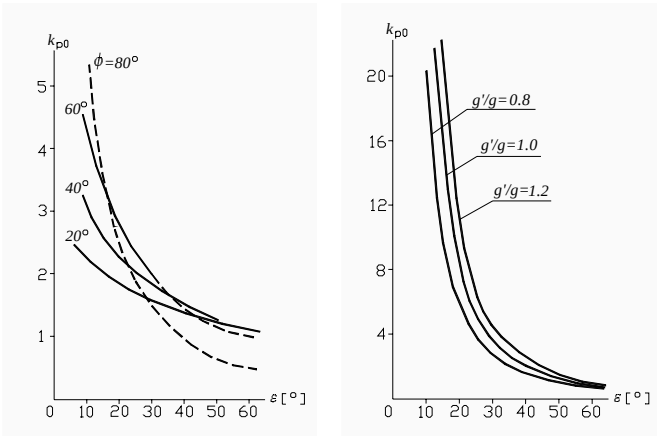
$$\varpi_{\sigma 0} = \frac{1}{2} arctg(\frac{2 \cdot tg\varepsilon}{1 - 3 \cdot \frac{g'}{g}}) \tag{9}$$

$$P_{1\sigma} = \frac{R_r \cdot b \cdot g}{(1 - 3 \cdot \frac{g'}{g}) \cdot (1 - \cos 2\omega) \cdot \cos\varepsilon - 2 \cdot \sin\varepsilon \cdot \sin 2\omega} \tag{10}$$

$$k_{p0} = \frac{P_1}{R_r \cdot b \cdot g} = \frac{1}{(1 - 3 \cdot \frac{g'}{g}) \cdot (1 - \cos 2\omega) \cdot \cos\varepsilon - 2 \cdot \sin\varepsilon \cdot \sin 2\omega} \tag{11}$$

Zależność względnej siły zapoczątkowującej odspajanie przez rozrywanie od kąta $\boldsymbol{\varepsilon}$ przedstawiono na rysunku 2b.

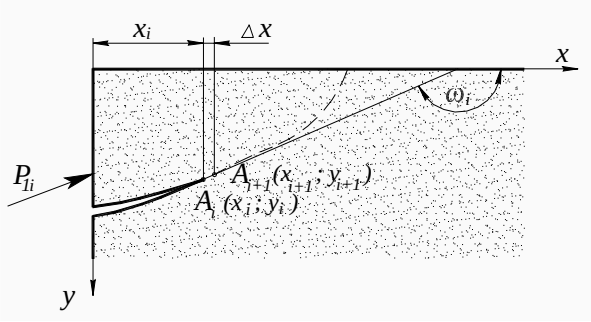
a) b)



Rys. 2. Względna siła odspajania w funkcji kąta **ε** *przy ścinaniu (a) i odrywaniu (b) naroża skały (linia przerywana wynika z ograniczenia zakresu stosowalności wzorów na ścinanie)*

Ponieważ wraz z pęknięciem zmienia się stan naprężenia w górotworze, a tym samym warunki dla dalszej propagacji tego pęknięcia, linia odspajania przybierze kształt krzywej. W celu jej określenia wprowadzono prostokątny układ współrzędnych Oxy. Tak, że oś x pokrywa się z linią zarysu odsłoniętej powierzchni skały i jest zgodna z kierunkiem wnikania narzędzia, a oś y przechodzi przez punkt stanowiący wierzchołek strefy sprasowania czy też szczeliny wyprzedzającej (punkt A_0 Rys.1). Gdy pęknięcie osiągnie punkt *A* (Rys.3) o współrzędnych (x,y) to naprężenia rozciągające w tym punkcie wyraża się wzorem:

$$\sigma_{rA} = \frac{2 \cdot P_{1\sigma}}{b \cdot y^2} \cdot [(3 \cdot x \cdot \sin\varepsilon + y \cdot \cos\varepsilon - 3 \cdot g' \cdot \cos\varepsilon) \cdot \sin^2\omega - y \cdot \sin\varepsilon \cdot \sin 2\omega] \tag{12}$$



Rys. 3. Propagacja pęknięcia odspajającego

Wyznaczony z powyższej zależności kąt ukierunkowania dalszej propagacji pęknięcia przedstawia się następująco

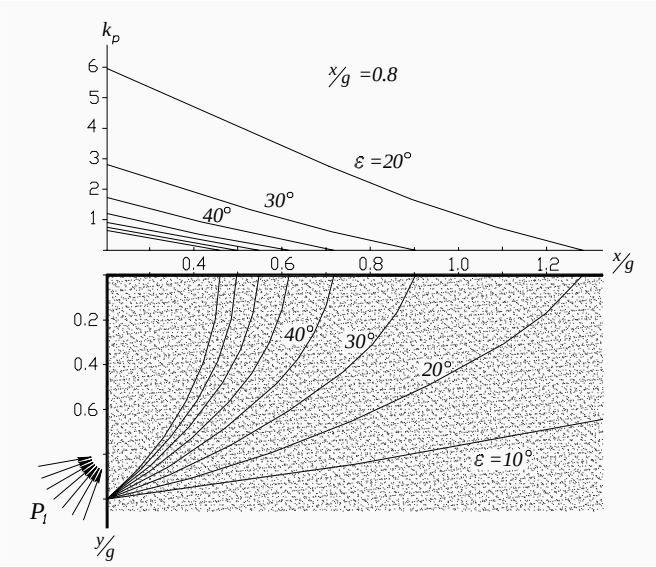
$$\omega(x,y) = \frac{1}{2} arc\,tg\left(\frac{2 \cdot y \cdot \sin\varepsilon}{3 \cdot x \cdot \sin\varepsilon + y \cdot \cos\varepsilon - 3 \cdot g' \cdot \cos\varepsilon}\right) \tag{13}$$

Tangens tego kąta, w przyjętym układzie współrzędnych, równa się współczynnikowi kierunkowemu stycznej do linii odspajania w punkcie A(x, y):

$$tg\,\omega(x,y) = y'(x) \tag{14}$$

Z dwóch ostatnich zależności (13, 14) dochodzi się do równania różniczkowego pierwszego rzędu. Całka szczególna tego równania dla określonych warunków zapoczątkowania pęknięcia, stanowi równanie linii odspojenia. Całkowanie przeprowadzono metodą geometryczna przy pomocy komputera. W rezultacie dla różnych parametrów wyjściowych, określających warunki zapoczątkowania pęknięcia otrzymano pęk linii odspojeń.

Linie odspojeń i zmiany wartości względnej siły odspajania w miarę propagacji pęknięcia dla różnych kątów oddziaływania narzędzia ε przedstawia wykres (Rys.4).



Rys.4. Linie odspojeń i zmiany wartości względnej siły odspajania w miarę propagacji pęknięcia dla różnych kątów oddziaływania narzędzia ε

Można zauważyć, że krzywe odspojeń przypominają krzywe łukowe teorii Evansa [3] ale nie są to łuki kołowe.

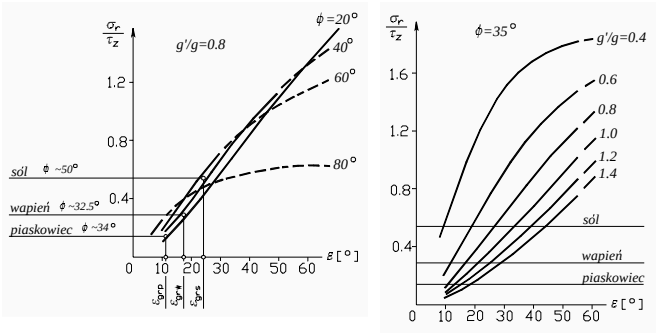
c) Określenie przedziału występowania poszczególnych form odspajania

Porównując stosunek wartości naprężeń rozciągających i stycznych ze stosunkiem wytrzymałości na rozrywanie i ścinanie (kohezją), można wyznaczyć parametry przejścia z jednej formy odspajania w drugą:

$$\frac{\sigma_{r0}(\omega_{\sigma 0})}{\tau_z(\omega_\tau)} = \frac{R_r}{c} \tag{15}$$

W przypadku gdy lewa strona równania jest większa od prawej nastąpi odspojenie łukowe poprzez rozerwanie materiału skalnego. Gdy przeciwnie, nastąpi ścięcie i powstanie odspojenie prostoliniowe. Podstawiając do wyrażenia (15) odpowiednie wartości ze wzorów (1), (5), (6), (9), otrzymuje się równanie opisujące parametry przejścia z jednej formy odspajania w drugą. Krzywe obrazujące zmiany lewej strony tego równania, w funkcji kąta oddziaływania narzędzia dla różnych wartości kąta tarcia wewnętrznego ϕ i różnego stosunku g'/g przedstawiono na wykresach (Rys.5a i Rys.5b).

a) b)



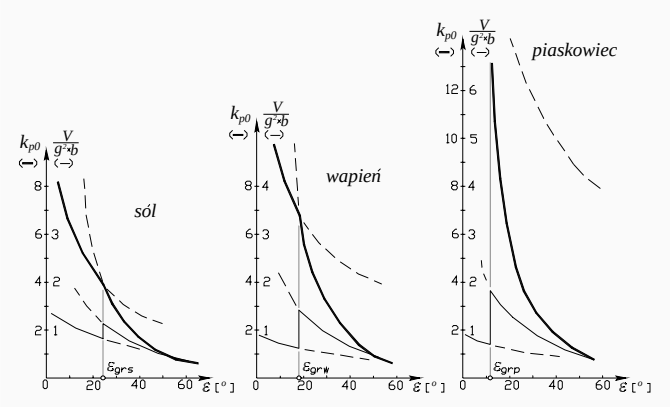
Rys.5. Zależność stosunku σ_{r0}/τ_z *od* ε *przy różnym kącie tarcia wewnętrznego* ϕ *(a) i dla różnych względnych głębokości przyłożenia siły odspajającej* **g'/g** *(b) (Linia przerywana wynika z ograniczenia zakresu stosowalności wzorów na ścinanie)*

Analizując wykresy można dojść do wniosku, że odspajaniu przez rozerwanie sprzyjają takie właściwości skały jak:
- duży kąt tarcia wewnętrznego ϕ,
- mała wartość stosunku R_r/c,

a także takie parametry oddziaływania narzędzia jak:
- duży kąt oddziaływania ε,
- duża odległość od progu g.

Punkt przecięcia się linii poziomej odpowiadającej wartości stosunku R_r/c dla określonej skały z krzywą odpowiadającą wartości kąta tarcia wewnętrznego ϕ dla tej skały, wyznacza stan graniczny przejścia z jednej formy odspajania w drugą. Odpowiadająca temu punktowi wartość kąta ε_{gr} jest wartością graniczną. Dla mniejszych wartości tego kąta następuje odspajanie przez ścięcie, dla większych przez rozerwanie. Punkty stanów granicznych i odpowiadające im wartości kątów granicznych dla trzech wybranych skał soli wapienia i piaskowca przy określonym stosunku g'/g zaznaczono na wykresie (Rys.6). Dla tych samych skał sporządzono wykresy zmian względnej siły odspajania i względnej objętości odspajanej w funkcji kąta ε (uwzględniając fakt przechodzenia z jednej formy odspajania w drugą przy kącie granicznym).

Jak widać przejście z odspajania przez ścinanie na odspajanie przez rozrywanie powinno skutkować spadkiem wartości względnej siły odspajania i gwałtownym przyrostem objętości odspajanej. W pro-



Rys. 6. Względna siła odspajania i względna objętość odspajania w funkcji ε *określona na drodze teoretycznej dla soli, wapienia, piaskowca*

cesie urabiania przejście takie powinno zaowocować zwiększeniem objętości odspajanych brył skalnych, a wiec grubszym sortymentem urobku.

4. Podsumowanie

Podsumowując analizę teoretyczną stanu wytężenia skały i przebiegu odspajania większych brył skalnych należy stwierdzić, że:

- w drugiej fazie elementarnego procesu urabiania teoretycznie możliwe są dwie formy odspojenia: poprzez ścięcie i poprzez rozerwanie skały, przy czym odspajanie poprzez ścięcie następowało będzie dla małych wartości kąta oddziaływania ε, a poprzez rozrywanie dla dużych,
- na moment przejścia z jednej formy odspajania w druga wpływ maja ε, g'/g, ϕ, R_r, c,
- przejście z odspajania przez ścinanie na rozrywanie powinno pociągnąć za sobą znaczny przyrost objętości brył odspajanych i spowodować szybszy spadek wartości siły odspajajacej,
- linia odspojenia przy ścinaniu ma kształt linii prostej,
- proces odspajania poprzez ścięcie w dużej mierze zależy od kąta tarcia wewnętrznego ϕ i powinien charakteryzować skały o raczej średnich i małych wartościach tego kąta,
- kształt linia odspojenia przy rozrywaniu jest zbliżony do łuku (rys.4) i zależy od kąta oddziaływania siły odspajajacej ε i miejsca jej przyłożenia (g'/g).

Spis oznaczeń

σ_c - naprężenia ściskające
σ_{r0} - naprężenia rozrywające zapoczątkowujące odspojenie
τ_{max} - maksymalne naprężenia styczne
τ_z - składowa naprężeń ścinających pokonująca siły spójności skały (w momencie ścinania τ_z=c)
ϕ - kąt tarcia wewnętrznego
ε - kąt działania siły odspajającej (rys.1)
ω - kąt płaszczyzny rozpatrywanego przekroju określony w stosunku do powierzchni odsłoniętej (rys.1)
ω_τ - kąt odspojenia przy ścinaniu
$\omega_{\sigma 0}$ - kąt zapoczątkowania odspojenia przy rozrywaniu
g - głębokość zapoczątkowania odspojenia (rys.1)
g' - głębokość przyłożenia siły odspajającej (rys.1)
b - szerokość narzędzia
P_l - siła oddziaływania na odspajany odłamek skalny
$P_{l\tau}$ - siła inicjująca ścięcie
$P_{l\sigma}$ - siła zapoczątkowująca odspajanie przez rozrywanie
k_p - względna siła odspajania
k_{p0} - względna siła zapoczątkowania odspajania
R_r - wytrzymałość na rozrywanie
c - stała kohezji dla skał (spójność skały)

5. Literatura

[1] Bieron A. I.: *Ob. Osnownych eksperimentalno-analiticzeskich teorii riezania ugla i gornych porod.*. Sb. Sowierseństwowanie Razrabotki Ugolnych Miestorożenij. Ugletiechizdat 1959.
[2] Bocsanczy J.: *Laborversuche uber die Zerspanung von Kohle und Gestein*. Gluckanf – Forschungshefte 34 /1973/ s19-23.
[3] Evans J.: *Basic Mechanics of the Point – Attack Pick.* Colliery Guardian, May 1984.
[4] Evans J., Pomerog C.D.: *The Strength, Fracture and Workability of Coal.*. Oxford. Pergamon Press 1966.
[5] Frołow A.G.: Metoda zwiększania ilości grubych sortymentów i zmniejszania zapylenia przy wydobywaniu węgla. Mechanizacja Górnictwa 1971, Nr 4/39.
[6] Kasjan M. W.: *Niekotoryje zakonomiernosti rezania jestestwiennych kamniej*. Sb. Razrušenie uglei i porod. Ugletechizdat 1958.
[7] Nishimatsu Y.: *The mechanics of rock cutting*. Int.J.Rock Mech. Min. Sci. Vol.9/1972) s. 261-270.
[9] Walczak J.: *Wytrzymałość materiałów oraz podstawy teorii sprężystości i plastyczności*. PWN Warszawa 1978.
[10] Zniszczyński A.: *Wpływ geometrii narzędzi ostrokrawędziowych na urabianie skał i skład ziarnowy urobku.* Praca doktorska. Politechnika Śląska w Gliwicach 1987.