ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2002
Seria: GÓRNICTWO z. 255 Nr kol. 1564

Krzysztof FILIPOWICZ
Politechnika Śląska, Gliwice

OPTYMALIZACJA DOBORU MATERIAŁÓW NA OSTRZA NARZĘDZI GÓRNICZYCH

Streszczenie. W pracy przedstawiono rezultaty badań doświadczalnych własności użytkowych węglików spiekanych. Badania pozwoliły na identyfikację tzw. stanu przejściowego pomiędzy dwoma procesami zużycia - pękaniem i zużyciem ściernym. Dokładna identyfikacja stanu przejściowego dla każdego gatunku węglika spiekanego była możliwa dzięki odpowiednio dobranemu kształtowi próbek oraz zastosowanej metodzie badawczej. W oparciu o dane ilościowe ubytku masy próbek wyznaczono parametry charakteryzujące odporność badanych węglików spiekanych na pękanie i na zużycie ścierne.

OPTIMAL SELECTION OF MATERIALS FOR MINING TOOLS

Summary. Abrasive wear and brittle fracture lead to massive losses of function in drilling and mining equipment involving high replacement costs and extended downtime. In industrial processes involving direct impact and rubbing contact the main question remains unanswered-namely what is the optimal balance between wear resistance and fracture toughness of rock-bit hard metals. The apparatus and method presented in this paper night be able to fill this gap. The apparatus used simulated the tribo-condition between drilling (mining) tools and the rock. The equation that enables calculation of the fracture toughness factor K_{WR}, based on results from the carefully controlled repeated abrasion tests, is presented.

1. Wprowadzenie

Szczególnie korzystna kombinacja własności, takich jak: wysoka twardość, odporność na zużycie ścierne, wytrzymałość na ściskanie i relatywnie wysoka odporność na kruche pękanie, powoduje szerokie zastosowanie węglików spiekanych (szczególnie typu WC – Co) jako materiałów na ostrza narzędzi górniczych i wiertniczych (np. noże kombajnowe, wiertła, koronki itp.).

Wysoka twardość i odporność na zużycie ścierne sprawiają, że narzędzia wykonane z węglików spiekanych charakteryzuje duża trwałość i wydajność technologiczna (np. prędkość wiercenia). Spiekane węgliki wolframu są nie tylko twardsze od stali narzędziowej, ale zachowują tę przewagę w całym zakresie temperatur pracy [1]. Mają natomiast istotnie niższą od stali odporność na kruche pękanie, co się przejawia objętościowymi wykruszeniami w trakcie użytkowania w warunkach dynamicznie zmieniających się obciążeń charakterystycznych dla procesu urabiania węgla i skał w wysoko wydajnych kompleksach ścianowych i chodnikowych.

Wybór węglika spiekanego dla konkretnego zastosowania praktycznego wiąże się z zadaniem osiągnięcia najkorzystniejszej proporcji między powyższymi mechanizmami zużycia. Duży procentowy udział lepiszcza (Co) daje wysoką ciągliwość, gdyż propagacja pęknięcia przez kobalt wiąże się z dysypacją względnie dużej energii. Wprost przeciwnie, transkrystaliczne pęknięcia przez ziarna węglików mają charakter niskoenergetycznych pęknięć kruchych. Procentowy udział pęknięć przez ziarna węglików lub wzdłuż granicy tych ziaren wynosi średnio od 60% do 80% [2].

Wyznaczenie wartości krytycznego współczynnika intensywności naprężeń K_{IC} dla węglików spiekanych i ceramików dokonuje się na próbkach o różnej geometrii zawierających koncentrator naprężeń [3] [4]. Najczęściej stosowane są próbki w kształcie belki prostopadłościennej do trój– lub czteropunktowego zginania oraz krótkiego wałeczka z daszkowym nacięciem (Chevron notch). Metody te są kosztowne [3] i żadna z nich nie uzyskała międzynarodowej akceptacji jako metoda standardowa dla węglików spiekanych i materiałów ceramicznych [5].

Niniejsze opracowanie jest próbą udoskonalenia nowej metodyki badań, pozwalającej na łatwe wyznaczenie odporności na kruche pękanie węglików spiekanych w oparciu o dane uzyskane w trakcie badań odporności na zużycie ścierne wykonane zgodnie z opracowaną procedurą. Metodyka badań oraz oprzyrządowanie stworzone dla jej realizacji, pozwala na bliskie odwzorowanie warunków tribologicznych między narzędziem górniczym i skałą. Proponowana metoda łączy w sobie badania odporności materiałów na zużycie ścierne zastępując z powodzeniem metodę ASTM B611 [3], [5] oraz badania odporności na kruche pękanie zastępując z powodzeniem np. metodę wgłębnikową Palmqvista/Vickersa [6].

2. Metoda i narzędzia badawcze

Badania doświadczalne, mające na celu wyznaczenie wartości wskaźników odporności na zużycie ścierne i pękanie materiałów stosowanych na ostrza narzędzi, wykonano zgodnie z opracowaną do tego celu procedurą na stanowisku badawczym opisanym wcześniej w poz. [7], [8] i [9].

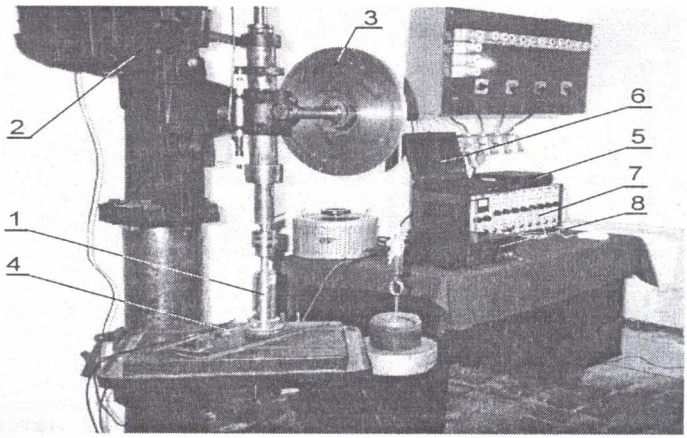
Zaprojektowane stanowisko pozwala na odwzorowanie stanu naprężeń i warunków kinematycznych między narzędziem górniczym a skałą. Wygląd stanowiska badawczego, dostosowanego do przeprowadzenia założonego w projekcie programu badań przedstawia rysunek 1.

W celu doboru podstawowych, najbardziej optymalnych parametrów badań, przeprowadzono ich dokładną optymalizację. Proces ten dotyczył następujących wielkości:

- optymalizacja wielkości szczeliny pomiędzy dyskiem a wewnętrzną powierzchnią cylindrycznego pojemnika (przyjęto wartość 0,3 mm),
- optymalizacja wysokości próbki (przyjęto wartość 4 mm),
- optymalizacja obciążenia zewnętrznego osiowego, działającego na dysk (przyjęto wartość 1600 N),
- optymalizacja kształtu próbek (przyjęto kształt graniastosłupa o podstawie trójkąta równobocznego),
- optymalizacja i dobór kąta ostrza próbki (przyjęto kąt wierzchołkowy równy 60°),
- optymalizacja i dobór ścierniwa (przyjęto jako ścierniwo korund Al_2O_3).

W czasie prób mierzono lub rejestrowano następujące wielkości:

- ubytek masy próbki,
- moment obrotowy na wale napędzającym dysk z próbką,
- temperaturę w najbliższym otoczeniu próbki,
- przemieszczenie liniowe osiowe wałka wraz z dyskiem,
- prędkość obrotową wałka,
- liczbę obrotów wałka.



Rys. 1. Stanowisko badawcze w warunkach ruchowych: 1 - tribotester, 2 - wiertarka słupowa, 3 - układ obciążnikowy, 4 - zestaw czujników pomiarowych, 5 - zespół przetworników i wzmacniaczy pomiarowych, 6 - komputer pomiarowy, 7 - mostek tensometryczny, 8 - układ wykonawczy automatycznego sterowania wiertarką

Fig. 1. Test stand: a) overall set-up of the stand, b) diagram of the stand; 1 – tribotester, 2 – drilling machine, 3 – load, 4 – torque indicator, 5 – transducer, 6 – computer data processing system, 7 – amplifier, 8 – test controller

Mierzone wielkości z eksperymentów wykorzystano do wyliczenia następujących wskaźników, charakteryzujących proces zużywania badanych materiałów na ostrza narzędzi. Wskaźnikami tymi były:

Z_M - zużycie masowe, mg,

Z_V - zużycie objętościowe, mm^3,

$Z_{Vśr}$ - zużycie objętościowe średnie, mm^3,

WR - odporność na zużycie, mm^{-3},

EWR - efektywna odporność na zużycie, kJ mm^{-3},

ΔZ_V - wstępny przyrost zużycia, zdefiniowany jako różnica pomiędzy zużyciem próbki w trakcie pierwszej próby (niestabilna faza wykruszeń) a wartością średnią zużycia $Z_{Vśr}$ (rys.2),

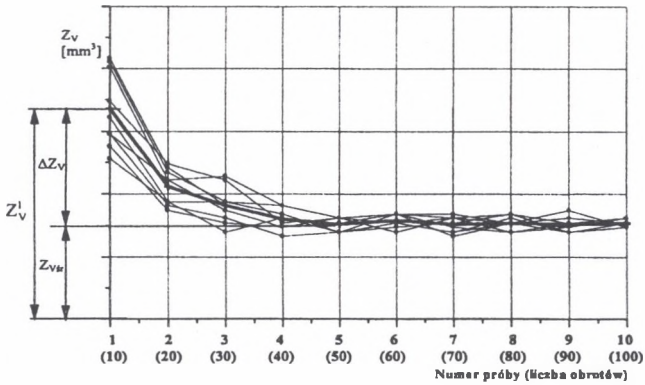
S - ekwiwalentna nowa powierzchnia utworzona w pierwszej próbie w wyniku pękania (wykruszania krawędzi), mm^2.

Głównym przedmiotem badań była grupa węglików spiekanych (WC-Co) z gatunków przeznaczonych na ostrza narzędzi górniczych. Do badań wyselekcjonowano 13 gatunków węglików spiekanych produkcji Węgliki Spiekane „Baildonit" w Katowicach, z których 11 (jako osobna grupa) poddano dodatkowemu dogęszczaniu w czasie 1 godziny, pod ciśnieniem 100 MPa, w temperaturze od 1340° do 1380° oraz cztery węgliki spiekane produkcji Planzee TIZIT (Austria).

3. Wyniki badań i dyskusja

Procedura badań została tak dobrana, aby możliwe było wyznaczenie przebiegu zużycia próbek węglików spiekanych w funkcji ilości wykonanych przez nią obrotów. Typowy przebieg serii prób dla jednego węglika spiekanego przedstawia rysunek 2. Pojedyncza próba składa się z 10 obrotów, po której wyznaczano każdorazowo zużycie masowe Z_M oraz zużycie objętościowe Z_V, a następnie pozostałe wskaźniki.

Wyniki programu badań węglików spiekanych przedstawiono graficznie na rys. 3 i 4.

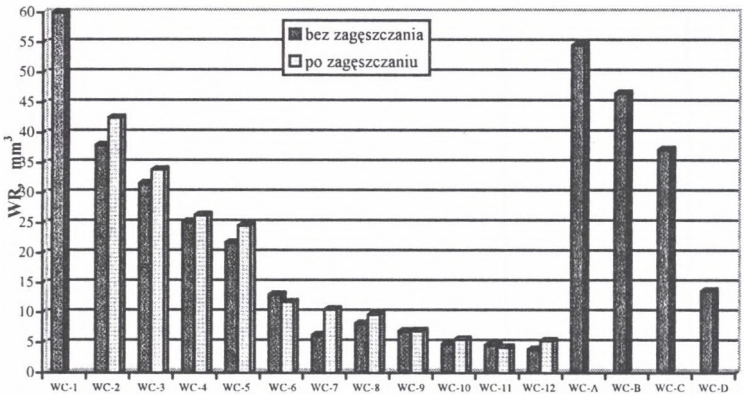


Rys. 2. Graficzna interpretacja wskaźników zużycia Z_V^1, ΔZ_V oraz $Z_{Vśr}$ na przykładzie węglika spiekanego G10 (BAILDON) w kontakcie z korundem

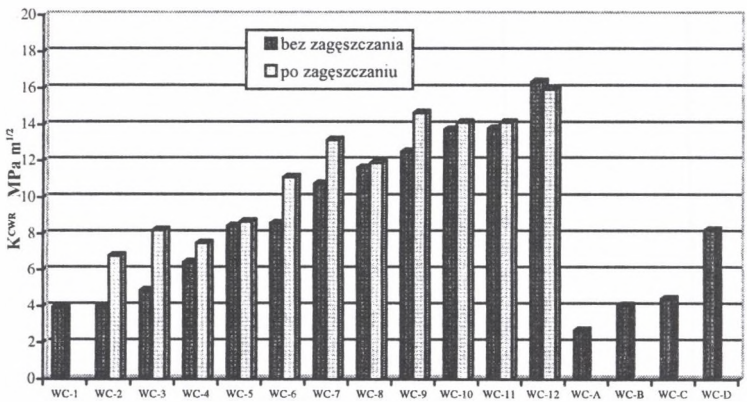
Fig. 2. Graphical interpretation of wear indicators such as Z_V^1, ΔZ_V and $Z_{Vśr}$ based on experimental data with grade G10 (BAILDON) tested with corundum as an abradant

Rysunek 3 przedstawia porównanie odporności na zużycie WR badanej grupy węglików spiekanych. Wyniki wykazały, że metoda daje dobrą rozdzielczość i pozwala na dokonanie jednoznacznego porównania wartości liczbowych wskaźników WR jako miary odporności materiału na zużycie ścierne. Węgliki spiekane o symbolach WC-2 do WC-12 zostały poddane dodatkowemu, potechnologicznemu dogęszczaniu (HIP). Jak wykazuje rysunek 3, dla większości węglików spiekanych dodatkowe zagęszczanie zwiększyło WR od kilku do kilkunastu procent. Rysunek 4 przedstawia natomiast porównanie odporności na pękanie K_{CWR} dla badanej grupy węglików spiekanych. Dzięki ww. metodzie badań można stosunkowo szybko dokonać rankingu materiałów stosując kryterium odporności na kruche pękanie. Metoda pozwoliła także stwierdzić istotny wzrost odporności na pękanie materiałów WC-2 oraz WC-3 po zastosowaniu dodatkowego dogęszczania, co należy tłumaczyć zmniejszeniem się por (koncentratorów naprężeń) dla badanej grupy węglików spiekanych.

Próbki o przekroju trójkątnym zostały zastosowane w celu wyeksponowania zjawisk tribologicznych, które zachodzą na styku narzędzie/skała w strefie krawędzi skrawającej (np. ostrze wiertła). Wszystkie serie pomiarów zużycia wykazały przebieg podobny do przykładu przedstawionego na rysunku 2. W przebiegach tych można wyszczególnić fazę wstępną niestabilnego zwiększonego zużycia, w którym dominującym mechanizmem ubytku masy próbki było pękanie i odkruszanie krawędzi próbki (rys.5a,b), oraz następującej później fazę ustabilizowanego zużycia, w którym dominowało mikroskrawanie i mikrobruzdowanie powierzchni próbki przez ziarna ścierniwa (rys.5c,d).



Rys. 3. Porównanie wyników badań odporności na zużycie ścierne WR grupy węglików spiekanych
Fig. 3. Graphical comparison of the wear resistance WR values of the hardmatal grades tested

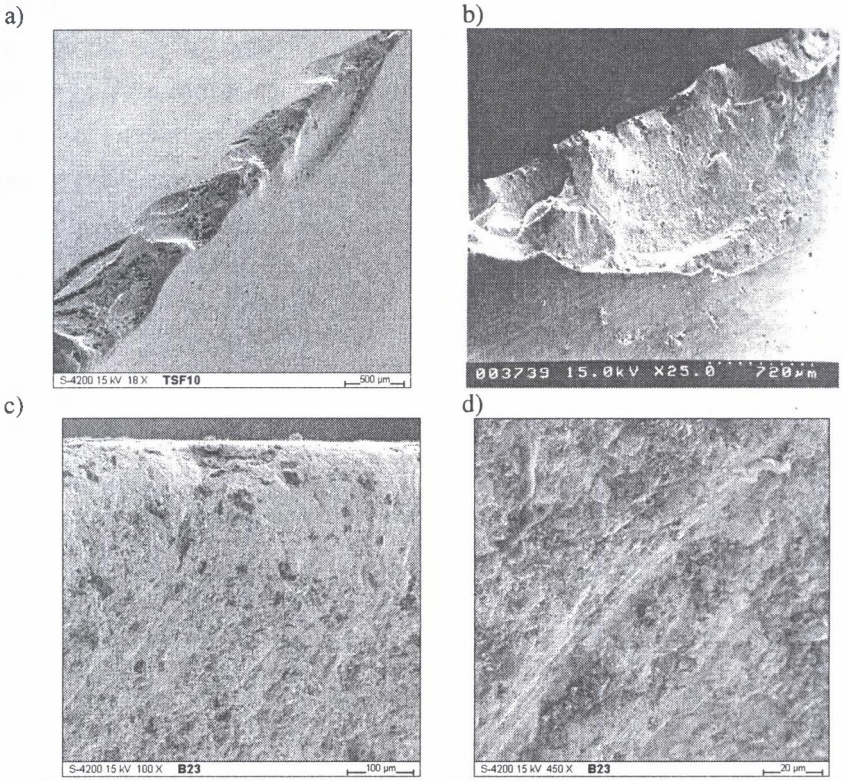


Rys. 4. Porównanie wyników badań odporności na pękanie grupy węglików spiekanych
Fig. 4. Graphical comparison of the fracture toughness, K_{CWR} values of the hardmetal grades tested

Opierając się na stwierdzeniu, że w fazie początkowej zużycie jest wywołane propagacją pęknięć, oraz bazując na doświadczeniach związanych z wyznaczaniem odporności na kruche pękanie metodami wgłębnikowymi Palmqvista/Vickersa do wyznaczenia wskaźnika odporności na pękanie K_{CWR}, po przeprowadzeniu analizy statystycznej kilku modeli, zastosowano model obliczeniowy w postaci:

$$K_{CWR} = 0{,}38 \cdot \left(\frac{E}{HV}\right) \cdot \left(\frac{1}{S}\right) \cdot (P_W \cdot Q)^{\frac{1}{2}} \tag{1}$$

Uzyskane w trakcie badań wyniki i weryfikacja modeli obliczeniowych wykazały, że powyższy model zużycia w fazie niestabilnej (równanie (1)) opracowany dla węglików spiekanych typu WC-Co może być stosowany do wyliczenia odporności na kruche pękanie bazując na wynikach z testów tribologicznych o ściśle określonej procedurze.

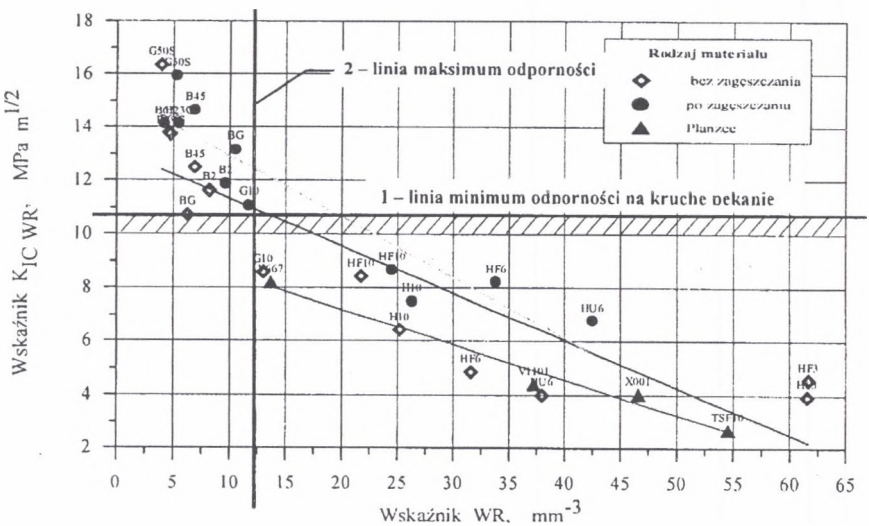


Rys. 5. Zdjęcia mikroskopowe (SEM) krawędzi próbek, gdzie: a, b) w trakcie pierwszego niestabilnego etapu zużycia, dominuje w nim ubytek masy przez propagację pęknięć i wykruszeń ostrej krawędzi próbek, c, d) w ustabilizowanym etapie zużycia, gdzie dominują mechanizmy zużycia ściernego, widoczne na zdjęciu bruzdowanie i rysowanie

Fig. 5. Triangular bar edges with: a, b) fractured and chipped-of fragments during the transition stage of wear, c, d) distinct cutting and ploughing action of abrasive mineral after steady stage of wear

Cechą szczególną metody jest możliwość łącznego badania ciągliwości i odporności na zużycie ścierne materiałów na ostrza narzędzi. Badanie łączne znaczy, że obie charakterystyki materiałów (często konfliktowe) otrzymuje się w trakcie jednorodnego eksperymentu lub serii jednorodnych eksperymentów, przy użyciu jednego przyrządu, jednego kształtu próbki i jednej procedury badań. Wyniki badań dla analizowanej grupy materiałów można przedstawić na wykresie o współrzędnych K_{CWR} i WR jak na rysunku 6.

W oparciu o rysunek 6 można dokonać doboru najkorzystniejszego węglika spiekanego dla konkretnych wymagań eksploatacyjnych. Pierwsze kryterium wyboru to tzw. linia minimalnej odporności na kruche pękanie, które jest zdeterminowane przez twardość np. skały lub jej wytrzymałość na ściskanie. To kryterium może być wyznaczone tylko w oparciu o badania eksploatacyjne i analizę statystyczną przypadków wykruszania ostrzy noży urabiających lub ostrzy wierteł. Jeżeli tą wielkością kryterialną jest np. $K_{CWR} = 11$ MPa·m$^{1/2}$, to znaczy że tylko te materiały, które znajdują się powyżej, nadają się dla takiego zastosowania. Z tej grupy należy wybrać materiał, który ma maksymalną odporność na zużycie ścierne. Wyznacza go linia maksymalnej odporności na zużycie ścierne. Dla przedstawionej przykładowo wartości $K_{CWR} = 11$ MPa·m$^{1/2}$ optymalnym węglikiem spiekanym na ostrze narzędzia jest węglik z gatunku G 10 po dodatkowym dogęszczaniu.



Rys. 6. Zależność pomiędzy odpornością na zużycie ścierne WR a odpornością na kruche pękanie K_{CWR} dla grupy badanych węglików spiekanych: 1 – linia minimum odporności na kruche pękanie, 2 – linia maksimum odporności na zużycie ścierne

Fig. 6. Relationship between abrasion resistance WR and fracture toughness K_{CWR} of the hardmetal tested: 1 – line of the minimal acceptable fracture toughness level and 2 – line of maximal wear resistance value

4. Wnioski

Z przeprowadzonych badań wynikają następujące wnioski:

- Opracowana procedura łącznego wyznaczania odporności na pękanie i zużycie ścierne materiałów przeznaczonych na ostrza narzędzi pozwalają na jednoznaczną dwukryterialną optymalizację doboru tych materiałów (rys.6).
- Dodatkowe dogęszczanie węglików spiekanych wpłynęło istotnie na badane wielkości węglików spiekanych o małej i średniej zawartości kobaltu (3÷6%). Przykładowo, dla węglika spiekanego WC-2 wzrost odporności na zużycie ścierne był rzędu 12%, natomiast wzrost odporności na kruche pękanie rzędu 70%.
- Metoda nadaje się do rankingu węglików spiekanych tak pod względem odporności na kruche pękanie, jak i zużycie, szczególnie gdy zastosowanie innych metod wyznaczania K_{IC} nie jest wygodne lub zbyt kosztowne.

LITERATURA

1. Larsen-Basse J., 1973: Wear of hard-metals in rock drilling: a survey of the literature, Powder Metallurgy 16, s.1÷32.
2. Sigl L.S., Exner H.E., 1987: Experimental study of the mechanics of fracture in WC-Co alloys. Metallurgical Transactions 18A, s.1299÷1308.
3. Roebuck B., Gee M.G., Morell R., 1996: Development in testing and mechanical properties of hard materials. Euro PM'96, Stockholm, s.229÷238.
4. Dusza J., Sajgalik P.: Fracture toughness and strength testing of ceramic composites. Advanced Materials Testing, ASTM, 1995, s.399÷434.
5. Scussel H., 1996: Friction and wear of cemented carbides. ASM Handbook. Vol.18, New York , s.795÷800.
6. Ponton C.B., Rawlings L.D., 1989: Vickers indentation fracture toughness test. Materials Science and Technology, s.865÷872.
7. Scieszka S.F., Filipowicz K., 1998: An integrated testing method for cermed abrasion resistance and fracture toughness evaluation. Wear, s.202÷212.
8. Filipowicz K., 1998: Zintegrowana metoda wyznaczania odporności na zużycie ścierne i pękanie materiałów stosowanych na ostrza narzędzi górniczych do małośrednicowego wiercenia obrotowego bez przepłuczki. Praca doktorska, Gliwice.
9. Ścieszka S.F., Filipowicz K., 2001: Materiały na narzędzia górnicze – nowe trendy w technice badań. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej. Gliwice.

Recenzent: Prof.dr inż. Włodzimierz Sikora

Abstract

Fracture toughness and wear resistance are two of the major material characteristics to take into consideration when designing mining tools, particularly inserts for rotary and percussion – rotary drilling, inserts for mining shearer picks and rotary picks made of hardmetals (WC-Co cemented carbides). This is mainly due to the high risk of brittle fracture in tools made of these materials and due to the importance of resistance to abrasion where the contact pressure between the component and abrasive is high such as in mining and rock drilling. WC-Co hardmetals are materials that combine high abrasion resistance and hardness with reasonable levels of toughness as a consequence of their microstructure. Nevertheless the main problem facing designers remains the fact that tungsten carbide tools may exhibit sudden brittle fracture at high stresses such as are encountered in rock drilling and cutting.

In rock drilling, the motion of the bit is apparently uniform and contact between the bit and rock steadily builds up force until the compressive or shear yield strength of the rock is reached and rock is moved out of the way of the bit. Although the operating conditions vary from one design to another, all drag bits procedure holes by one or more of three mechanisms: dislodging of granular rock, shearing of brittle rock and ploughing.

Since the fracture toughness is often the major limiting parameter governing the use of WC-Co drilling and cutting tools, there is a need for research aimed at increasing toughness without sacrificing wear resistance. To aid in this objective, a simple and reliable integrated testing method, such as that presented in this work is needed for quick assessment of progress in such research. These are several methods for the measurement of fracture toughness although there is no standard method for hardmetals.

The work presented in this paper consisted of further improvement of the method based on tribological transition assessment. The method enables the evaluation of fracture toughness and wear resistance using only one apparatus, one shape of specimen and one testing procedure.

The fracture – mechanics based model developed during the course of this investigation was used in the calculation of fracture toughness values for all hardmetal grades tested. The rating of hardmetals according to their fracture toughness as well as their resistance to abrasive wear in rubbing contact with particulate alumina are presented. The effect of additional hot isostatic pressing (HIPing) on mechanical properties of the hardmetals tested is also illustrated.

New integrated test method for the evaluation of the abrasion resistance and fracture toughness as well as test procedure and setting the optimal operating parameters of testing were discussed. A range of WC-Co hardmetals was tested by new method. The results showed that the method can be used for rating materials for such application as shearer picks and drill bit inserts.