

Krzysztof FILIPOWICZ  
Politechnika Śląska, Gliwice

## ZUŻYCIE ŚCIERNE MATERIAŁÓW NA NARZĘDZIA GÓRNICZE

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono zagadnienie mechanizmów zużywania się ostrzy narzędzi górniczych przy kontakcie z urabianą skałą. Z wymienionych mechanizmów dokładniej opisano jeden z procesów, a mianowicie zużycie ściernie materiałów na ostrza narzędzi górniczych, którymi głównie są materiały kompozytowe (np. WC-Co). Przedstawiono także analityczny opis kilku najczęściej występujących przypadków zużycia ściernego oraz wyróżniono czynniki mające wpływ na jego przebieg.

## ABRASIVE WEAR OF MATERIALS FOR MINING TOOLS

**Summary.** In the paper is presented a problem of wear phenomena appearing on mining tools during their contact with rocks. Among wear phenomena being discussed in this work, abrasive wear of composite materials (WC-Co), which are using for cutting edges of mining tools, has been described in detail. There are shown also analytical description of mostly appeared cases of abrasive wear and key factors influence on wear process.

### 1. Wprowadzenie

Ostrza górniczych narzędzi urabiających, występujące w systemach maszyn górniczych, narażone są na szczególnie wysokie naprężenia mechaniczne. Generowane naprężenia w strefach styku ostrza z urabianą skałą, mają podstawowy wpływ na intensywność zużywania się tych elementów. Wynika z tego, że zasadniczym zagadnieniem staje się odpowiedni dobór materiałów używanych na te elementy, głównie węglików spiekanych WC-Co w oparciu o badania odtwarzające możliwie dokładnie warunki eksploatacyjne.

Szerokie zastosowanie węglików spiekanych (szczególnie typu WC-Co) jako materiałów na ostrza narzędzi górniczych i wiertniczych (np. noże kombajnowe, wiertła, koronki itp.), jest spowodowane przede wszystkim ich szczególnie korzystną kombinacją własności, takich

jak: wysoka twardość, odporność na zużycie ściernie, wytrzymałość na ściskanie i relatywnie wysoka odporność na kruche pękanie. Własnościami tymi można „sterować” na etapie wytwarzania węglików, zmieniając np. procentową zawartość kobaltu lub wielkość ziaren węgla wolframu [2, 6, 12, 14, 17].

## 2. Procesy zachodzące przy zużywaniu się ostrzy narzędzi skrawających

W procesie urabiania skał narzędziami skrawającymi ostrza tych narzędzi, pracując w środowisku bardzo niejednorodnym o silnym oddziaływaniu ściernym, ulegają intensywnemu zużyciu. Zużycie ostrzy narzędzi górniczych jest procesem złożonym z wielu różnorodnych zjawisk, których intensywność i dynamika zmian zależy od parametrów i warunków tarcia.

Jak pisze J.Larsen-Basse [15], w trakcie wzajemnego oddziaływania ze skałą ostrza narzędzi ulegają procesowi degradacji, który daje się rozdzielić na cztery mechanizmy:

- mikroskrawanie i mikrobruzdowanie,
- mikroodpryski i łuszczenie,
- zmęczenie cieplne i pękanie,
- chemiczne reakcje z otoczeniem.

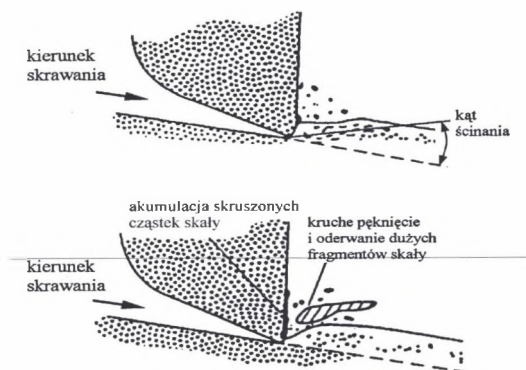
Próby zmniejszenia udziału jednego z mechanizmów, np. poprzez zmianę składu chemicznego lub ziarnowego dla węglików spiekanych, powoduje zwiększenie udziału pozostałych mechanizmów w procesie zużywania [12, 14, 15].

Proces skrawania węgla i skał opisali Goodrich, Fish i Barker [9], identyfikując trzy fazy procesu: zgniatanie, wykruszanie i nagłe odrywanie dużych fragmentów skał przez kruche pękanie (rys.1). Sekwencyjność tych faz generuje drgania w strefie wzajemnego styku (częstotliwość drgań rzędu 30 Hz) oraz kształtuje inne oddziaływania tribologiczne [2].

Zależnie od rodzaju skały i parametrów operacyjnych dominują następujące mechanizmy zużycia węglików spiekanych [12]:

- mikropeknięcia i odpryskiwanie krawędzi ziaren węglików wolframu,
- transkystaliczne pękanie ziaren węglików wolframu razem z międzykystalicznym pękaniem skały (mechanizm charakterystyczny dla dużych intensywności urabiania i wiercenia),

- ścieranie i polerowanie ziaren węglików wolframu i wybiórcze usuwanie osnowy metalowej (Co) przez skruszone ziarna skały oraz transkryystaliczne pękanie skał (mechanizm charakterystyczny dla małych intensywności urabiania i wiercenia),
- zmęczenie cieplne prowadzące do międzykryształicznych pęknięć.



Rys.1. Uproszczony schemat procesu skrawania skał złożonego z sekwencji faz zgniatania, rozkruszania i kruchego pęknięcia [9]

Fig.1. Simplified diagram of drag pick cutting sequential action consisted of three distinct stages namely: crushing, chipping and sudden fracture [9]

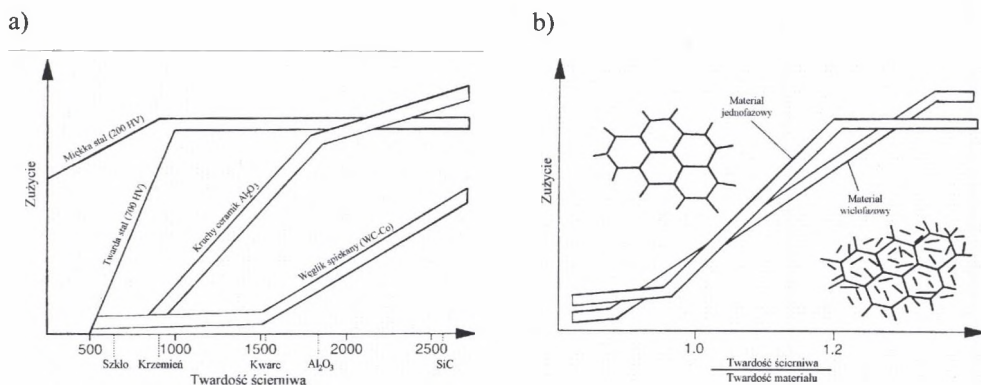
Podsumowując omawiane procesy, możemy stwierdzić, że postępujące zużycie ostrza narzędzia skrawającego, oddziałującego na caliznę oraz urobioną już skałę prowadzi w efekcie do utraty zdolności skrawnych, czyli do stępienia. Rozróżnia się dwa rodzaje stępienia, a mianowicie [2, 3, 4, 5]:

- stępienie na skutek postępującego zużycia ściernego ostrza,
- stępienie spowodowane chwilowym przekroczeniem doraźnej wytrzymałości ostrza, charakteryzujące się wyszczerbieniem lub pęknięciem ostrza.

### 3. Zużycie ściernie materiałów kompozytowych

Proces zużycia ściernego zachodzi wówczas, gdy ubytek materiału w warstwie wierzchniej jest spowodowany oddzielaniem cząstek wskutek mikroskrawania, rysowania lub brudowania. Taki proces występuje wtedy, gdy w obszarach tarcia współpracujących elementów znajdują się luźne lub utwardzone cząstki ścierniwa albo wystające nierówności twardszego materiału, które spełniają rolę umiejscowionych mikroostrzy. Analogicznie będą działać utlenione produkty zużycia w obszarze tarcia [10, 13].

Ogólne trendy zależności pomiędzy zużyciem materiału a własnościami cząstek ścierniwa schematycznie przedstawia rysunek 2. Ze wzrostem twardości ścierniwa zużycie materiału rośnie nawet o około dwa rzędy wielkości (rys.2a). To przejście z niskiego na wysokie zużycie zależy od stosunku twardości ścierniwa do twardości zużywającego się materiału (rys.2b). Dla materiałów jednofazowych przejście z niskiego na wysokie zużycie zaczyna się, gdy twardość zrównuje się z twardością materiału badanego. Materiał wielofazowy z twardym wypełniaczem wzmacniającym, którego twardość jest równa twardości materiału jednofazowego, ma osnowę miększą od osnowy materiału jednofazowego. Stąd przejście z niskiego do wysokiego poziomu zużycia zaczyna się i kończy, gdy twardości osnowy i fazy wzmacniającej zostają przekroczone przez twardość ścierniwa (rys.2b). Na wyższym poziomie zużywania zużycie materiału wielofazowego może być większe od zużycia materiału jednofazowego, jeżeli faza wzmacniająca będzie wrywana z powierzchni i gdy staje się dodatkowym ścierniwem. Ważnymi czynnikami takiego procesu zużywania są wielkości cząstek ścierniwa oraz wartości siły normalnej.



Rys.2. Schematyczne przedstawienie zużycia ściernego jako funkcji parametrów materiałowych, takich jak: a) twardość ścierniwa, b) stosunek twardości ścierniwa do materiału badanego

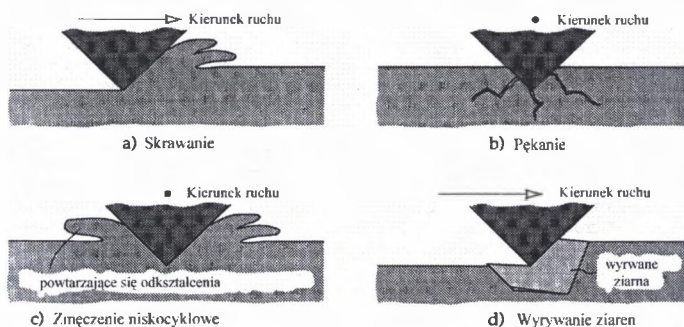
Fig.2. Schematic representation of wear loss by hard particles as a function of material properties and such: a – hardness abrasive particle, b – ratio of hardness of abrasive particle and hardness of the wearing material

Intensywność zużywania zależy zarówno od własności ścierniwa (twardość, wielkość ziaren, ich kształt), od własności materiału ścieranego (przede wszystkim twardości i modułu sprężystości), jak również od warunków, w jakich przebiega zużywanie (obciążenie, prędkość względna, temperatura, otoczenie) [8, 11].

Dla materiałów kruchych dodatkowym elementem wpływającym na zużycie ściernie jest kruchość materiału, wyrażona np. współczynnikiem intensywności naprężeń  $K_{IC}$ .

Wielu badaczy [1] przedstawia przykład teoretycznego modelu zużycia materiałów wielofazowych i kompozytowych w oparciu o zmodyfikowane równanie J.F.Archarda.

W propozycjach opisu zużycia ściernego oraz propozycjach modeli służących do przewidywania intensywności zużycia ściernego uwzględniono, że zużycie ściernie składa się z kilku bardziej elementarnych mechanizmów (rys.3), których wzajemny udział w generowaniu produktów zużycia i konstytuowanie eksploatacyjnej warstwy wierzchniej zmienia się w zależności od parametrów operacyjnych, materiałowych i innych opisujących system tribologiczny [7]. Te mechanizmy to skrawanie, pękanie, zmęczenie niskocyklowe, rozrywanie struktur wielofazowych na granicach faz.



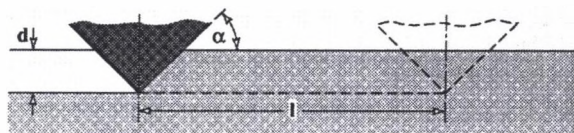
Rys. 3. Mechanizmy składowe procesu zużywania ściernego: mikroskrawanie, pękanie, zmęczenie i wyrwanie składników struktury wielofazowej [16]

Fig. 3. Mechanisms of abrasive wear: microcutting, fracture, fatigue and grain pull-out [16]

W materiałach kompozytowych, takich jak węgliki spiekane, można zaobserwować wszystkie cztery mechanizmy, przy czym skrawanie i zmęczenie w rezultacie deformacji lub bruzdowania dotyczy głównie osnowy metalicznej, natomiast pękanie i wyrwanie ziaren odnosi się do wypełniacza węglkowego.

### 3.1. Analityczne modele zużycia ściernego

Najprostszy model zużycia ściernego jest reprezentowany przez sztywny wierzchołek nierówności w kształcie stożka, przemieszczany wzdłuż ciała plastycznego (rys.4). W tym modelu zakłada się, że cała objętość materiału wypchniętego przez stożkowy wierzchołek przechodzi do produktów zużycia [16].



Rys. 4. Model zużycia ściernego przez pojedynczy stożkowy wierzchołek [16]  
Fig. 4. Model of abrasive wear by a single grit [16]

W modelu tym przybliżona objętość materiału usuniętego przez stożkowy wierzchołek wynosi:

$$V_g = \frac{2 l \operatorname{tg} \alpha}{\pi H} \cdot W_g \quad (1)$$

gdzie:  $V_g$  - objętość materiału wypchnięta przez stożek,  $\text{m}^3$

$l$  - droga przebyta przez stożek, m

$\alpha$  - kąt pochylenia, (rys.4)

$H$  - twardość, Pa

$W_g$  - obciążenie wierzchołka, N.

Stąd:

Zużycie całkowite jest sumą ubytków materiału, spowodowaną przez poszczególne wierzchołki nierówności, dlatego:

$$V_c = \sum V_g = \frac{2 l \operatorname{tg} \alpha}{\pi H} \cdot \sum W_g \quad (2)$$

lub

$$V_c = \frac{2 l \operatorname{tg} \alpha}{\pi H} \cdot W_c \quad (3)$$

gdzie:  $V_c$  - zużycie całkowite,  $\text{m}^3$

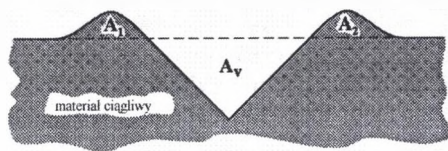
$W_c$  - obciążenie całkowite, N.

W rzeczywistości bardzo rzadko cała objętość materiału wypchnięta przez nierówność jest usuwana po jednym przejściu do produktów zużycia. Bardziej realistyczny model zakłada, że materiał jest częściowo przemieszczany do bocznych krawędzi (rys.5).

Skuteczność usuwania z powierzchni materiału ciągliwego wyznacza parametr  $f_{ab}$  definiowany jako stosunek objętości materiału usuniętego do objętości bruzdy  $A_v$ :

$$f_{ab} = 1 - \frac{A_1 + A_2}{A_v} \quad (4)$$

gdzie:  $f_{ab}$  - parametr skuteczności ścierania,  $f_{ab} = 1$  dla idealnego skrawania oraz  $f_{ab} = 0$  dla bezzużyciowego bruzdowania

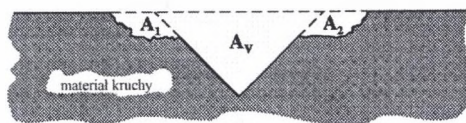


Rys. 5. Model usuwania i przemieszczania materiału ciągliwego [16]  
Fig. 5. Model of material removal and displacement in ductile abrasive wear [16]

Dla materiałów kruchych parametr  $f_{ab}$  uwzględnia fakt, że na krawędziach bruzdy występują dodatkowe odpryski (rys.6).

Dla kruchych materiałów parametr  $f_{ab}$  oblicza się ze wzoru:

$$f_{ab} = 1 + \frac{A_1 + A_2}{A_v} \quad (5)$$



Rys. 6. Model zużycia materiału kruchego [16]  
Fig. 6. Model of material removal in brittle abrasive wear [16]

Intensywność zużycia ściernego materiałów kruchych można opisać za pomocą równania [16]:

$$\Delta V = \Phi_1 p H_d^{-1} + \Phi_3 A_f D_{ab} p^{1,5} H^{0,5} \mu^2 \Omega K_{IC}^{-2} \quad (6)$$

gdzie:  $\Phi_1$  - współczynnik zależny od kształtu ścierniwa, dla kształtu piramidy wynosi 0,1

$p$  - naciski jednostkowe zewnętrzne, Pa

$H_d$  - twardość materiału ścieranego, odkształconego, Pa

$\Phi_3$  - współczynnik zależny od kształtu wykruszeń, dla kształtu piramidy wynosi 0,12

$A_f$  - powierzchnie pęknięć,

$D_{ab}$  - skuteczny wymiar ścierniwa,  $\mu\text{m}$

$H$  - twardość materiału ścieranego nieodkształconego, Pa

$\mu$  - współczynnik tarcia

$K_{IC}$  - odporność na kruche pęknięcie, Pa m<sup>0.5</sup>

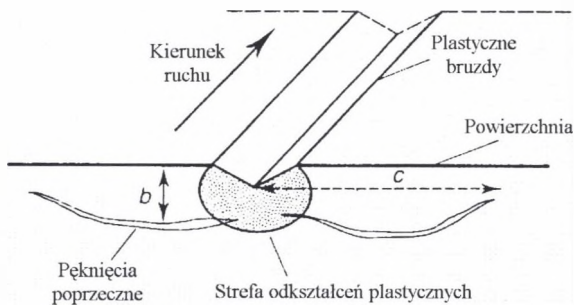
$\Omega$  - parametr  $\Omega = 1 - \exp\left(-\frac{P}{P_k}\right)^{0.5}$

$p_k$  - nacisk jednostkowy krytyczny dla materiału zawierającego pęknięcia, Pa.

Z modelu (równanie 6) wynika, że nie tylko twardość jest własnością kontrolującą odporność na zużycie ściernie materiału. Dla materiałów twardych i kruchych krytyczną własnością materiału, decydującą o jego odporności na zużycie ściernie, jest także jego odporność na kruche pęknięcie  $K_{IC}$ .

Tak więc zużycie ściernie składa się z plastycznego odkształcenia i kruchego pęknięcia materiału. W bardzo wielu przypadkach skojarzeń materiałów oraz dla różnych warunków tarcia oba mechanizmy występują równocześnie. Typowy, w skali mikro dla warunków oddziaływania między narzędziem górniczym a skałą, jest przypadek reprezentowany przez twardą cząstkę ścierniwa (skały), działającą punktowo na twardy i kruchy materiał narzędzia [11].

Jeden z modeli zużycia ściernego materiałów kruchych bazuje na generowaniu produktów zużycia przez rozwój pęknięć poprzecznych. Wraz z ruchem po powierzchni ostrych cząstek ścierniwa tworzących bruzdy generowane są i propagują w kierunku powierzchni pęknięcia poprzeczne (rys.7).



Rys. 7. Schematyczna ilustracja zużywania materiału kruchego przez propagację pęknięć poprzecznych [11]

Fig. 7. Schematic illustration of material removal in brittle material by the extension of lateral cracks [11]



Wymiary strefy objętej pęknięciem materiału wyznaczają równania (7) i (8):

$$c = \alpha_1 \frac{\left(\frac{E}{H}\right)^{3/5} w^{5/8}}{K_{IC}^{1/2} H^{1/8}} \quad (7)$$

oraz

$$b = \alpha_2 \left(\frac{E}{H}\right)^{2/5} \left(\frac{w}{H}\right)^{1/2} \quad (8)$$

gdzie:  $c$  - zasięg pęknięcia poprzecznego (rys.7),  
 $b$  - głębokość pęknięcia poprzecznego (rys.7),  
 $E$  - moduł Younga,  
 $w$  - obciążenie na pojedynczą cząstkę ścierniwa,  
 $\alpha_1, \alpha_2$  - stałe empiryczne.

Natomiast zużycie na jednostkową drogę tarcia w sytuacji jednoczesnego oddziaływania  $N$  cząstek ścierniwa opisuje równanie (9):

$$\dot{Z} = \alpha_3 N \frac{\left(\frac{E}{H}\right)^{9/8}}{K_{IC}^{1/2} H^{5/8}} \quad (9)$$

gdzie:  $\alpha_3$  - stała empiryczna.

Równanie (9) potwierdza, że odporność na kruche pęknięcie  $K_{IC}$  oraz twardość  $H$  w decydujący sposób wpływają na przebieg procesu zużywania ściernego materiałów twardych i kruchych [11].

#### 4. Podsumowanie

Zużycie ściernie materiałów stosowanych na ostrza narzędzi górniczych, którymi najczęściej są materiały kompozytowe (WC-Co), zależy zarówno od własności ścierniwa (twardość, wielkość ziaren, ich kształt) i od własności materiału ścieranego (przede wszystkim twardości i modułu sprężystości), jak również od warunków, w jakich przebiega zużywanie (obciążenie, prędkość względna, temperatura, otoczenie).

Dla materiałów kruchych dodatkowym elementem wpływającym na zużycie ściernie jest kruchość materiału, wyrażona np. współczynnikiem intensywności naprężeń  $K_{IC}$ .

Po analizie mechanizmów zużywania się tych materiałów można zaobserwować występowanie procesów skrawania i zmęczenia w rezultacie deformacji lub bruzdowania, które dotyczą głównie osnowy metalicznej oraz pęknięcia i wrywania ziaren odnoszących się do wypełniacza węglkowego.

## LITERATURA

1. Axen N., Jacobson S.: A model for the abrasive wear resistance of multiphase materials. *Wear*, 174, 1994.
2. Bailey S.G., Perrott C.M.: Wear Processes Exhibited by WC-Co Rotary Cutters in Mining. *Wear*, 29, 1974.
3. Bęben A., Grębski W., Missygar T.: Zużycie ostrzy koronek do wiercenia otworów strzałowych. *Górnictwo Odkrywkowe*, nr 3, 1977.
4. Bęben A.: Technika wiertnicza w odkrywkowym górnictwie skalnym. Śląskie Wydawnictwo Techniczne. Katowice 1992.
5. Bęben A.: Zużycie ostrzy narzędzi w procesie wiercenia otworów strzałowych. *Zagadnienia Eksploatacji Maszyn. PAN, Z.1*, 1974.
6. Clark G.G.: Principles of rock drilling and bit wear. *Colorado SOM Quarterly*, vol.77, N.2, 1982.
7. Czichos H.: Tribology: A Systems Approach to the Science of Friction, Lubrication and Wear. Elsevier. Amsterdam 1978.
8. Gierek A.: Zużycie ściernie metalowych elementów roboczych. Skrypty uczelniane Politechniki Śląskiej, nr 1752, Gliwice 1993.
9. Guo H., Aziz N., Schmidt L.: Rock cutting study using linear elastic fracture mechanics. *Engineering Fracture Mechanics*, 5, 1992.
10. Hebda M., Wachal A.: Trybologia. WNT, Warszawa 1980.
11. Hutchings I.M.: Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials. London - Melbourne - Auckland: Hodder and Stoughton 1992.
12. Jamison W.E.: Tools for rock drilling. M.B.Peterson and W.Winer, *Wear Control Handbook*, ASME, New York 1980.
13. Kragielskij I.V.: Trenie i iznos. Izd. II. „Mašinostroenie”, Moskwa 1968.
14. Larsen-Base J.: Wear of hard-metals in rock drilling. *Powder Metallurgy*, vol.16, nr 31, 1973.
15. Larsen-Basse J., Perrott C.M.: Abrasive wear of tungsten carbide-cobalt composites. *Materials Science and Engineering*, 13, 1974.
16. Stachowiak G., Batchelor A.: *Engineering Tribology*. Elsevier. Amsterdam 1993.
17. Ścieszka S.F., Filipowicz K.: Materiały na narzędzia górnicze. Nowe trendy w technice badań. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2001.

**Abstract**

Cutting edges of mining tools use in mining machines they are exposed to high value strains, so that the appropriate selection of using materials for cutting edges is an essential matter. A wide composite materials appliance for the edges of drilling and mining machines (shearers picks, rotary drills etc.) that is caused by particularly beneficial combination of properties such as: high value of hardness, resistance to abrasive wear, strength for compression and relatively high resistance to fracture toughness.

In the time of mutual acting with the rocks edges of cutting tools gets blunt. There are two types of blunting process namely:

- bluntness as an effect of progressing abrasive wear,
- bluntness as an effect of exceeding of material breaking yield point.

In proposal of the description of abrasive wear and models forecasting intensity of abrasive wear there is taken into considerations that abrasive wear is composed of a couple more elemental mechanisms. In group of composite materials such as carbides one can observe four mechanisms: cutting and fatigue, as an effect of deformation or ploughing, is related mainly to matrix whereas fracturing and tearing out of seeds is related to carbide filler. Abrasive wear of materials depends on properties of abrading material (hardness, size and shape of seeds) and abraded material (first of all hardness and Young's modulus) as well as that is influenced by circumstances of wearing process (load, velocity of counterparts, temperature).