

Krzysztof FILIPOWICZ, Stanisław F. ŚCIESZKA

## BADANIA MATERIAŁÓW DLA SYSTEMÓW TRANSPORTU I PRZERÓBKI WĘGLA

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono przyrząd do badania odporności na zużycie ściernie materiałów poddanych oddziaływaniu ziarn węgla. Przyrząd można stosować w szerokim zakresie nacisków, prędkości oraz można w nim odwzorowywać warunki tribologiczne charakterystyczne dla maszyn górniczych i dla przeróbki mechanicznej minerałów.

## MATERIALS TESTING FOR COLLIERY TRANSPORT AND DRESSING SYSTEMS

**Summary.** A apparatus has been developed to study the abrasive wear resistance of materials in sliding contact with coal. The apparatus has a wide pressure and velocity range, and can be used to simulate the tribological conditions in mining and mineral processing systems.

## UNTERSUCHUNGEN DER STOFFE FÜR TRANSPORTSYSTEME UND KOHLENAUSBEREITUNG

**Zusammenfassung.** Im artikel wurde der Apparat für Untersuchungen der Verschleissfestigkeit der Stoffe dargestellt, die der Einwirkung von Kohlenpartikeln ausgesetzt wurden. Dieser Apparat kann in grossen Umfang der Belastungen und Geschwindigkeiten angewandt werden. Der Apparat bildet die für Bergbaumaschinen und Mineralausberutung charakteristische, tribologische Bedingungen ab.

### 1. WSTĘP

Materiałom konstrukcyjnym stawia się coraz większe wymagania odnośnie do ich własności, jak również zakresu stosowania. Problem ten uwidacznia się między innymi w trakcie doboru materiałów stosowanych w budowie maszyn górniczych urabiających, transportujących i przeróbczych, przeznaczonych do pracy w środowisku o dużej agresywności ścierniej.

Intensywność zużycia materiałów konstrukcyjnych w tych warunkach staje się problemem, szczególnie gdy występuje synergizm tarcia z chemicznym i biologicznym oddziaływaniem środowiska na elementy maszyn.

Niniejsze opracowanie przedstawia nową metodę badania odporności na zużycie i stanowi nowe spojrzenie na problem doboru materiałów konstrukcyjnych. Zastosowany przyrząd badawczy pozwala na symulację procesu zużycia i na realizację badań, związanych z zużywaniem się materiałów konstrukcyjnych w przypadku, w którym dominującym mechanizmem zużycia jest zużycie ściernie w obecności kruszonego minerału.

Otrzymane wyniki badań pozwalają na sklasyfikowanie i określenie przydatności materiałów konstrukcyjnych według kryterium ich odporności na zużycie ściernie w kontakcie z rozdrobionym minerałem.

## 2. ZUŻYCIE MATERIAŁÓW I WŁASNOŚCI MECHANICZNE MINERAŁÓW

Zjawisko zużycia jest to ciągły proces niszczących zmian stanu pierwotnego powierzchni oraz zmian masy, składu chemicznego, struktury i naprężeń własnych warstwy wierzchniej materiału, spowodowany oddziaływaniem na jego powierzchnię ciał współpracujących i środowiska. Nie ma jednego uniwersalnego miernika zużycia, zgodnie bowiem z podaną uprzednio definicją procesu zużycia powoduje ono różnorakie objawy, które wymagają odmiennych metod pomiaru i mierników ilościowych.

Najczęściej jako miernik zużycia ciała przyjmuje się: zmianę ciężaru, objętości lub zmianę wymiarów liniowych. Odporność na zużycie w procesie ścierania próbki WR proponuje się ujmować jako stosunek energii włożonej w MJ do zużycia próbki w gramach, w trakcie procesu rotacji próbki w masie rozkruszonego minerału.

$$WR = \frac{EI}{\Delta W} \cdot 10^{-6}, \quad (1)$$

gdzie:

WR - odporność na zużycie ostrza, MJ/g

EI - wkład energii, J

$$EI = 2\pi T_{\text{śr}} i$$

$i$  - ilość obrotów

$T_{\text{śr}}$  - średni moment obrotowy, Nm

$\Delta W$  - ubytek masy próbki, g

$$\Delta W = m_1 - m_2$$

$m_1$  - masa ostrza przed próbą

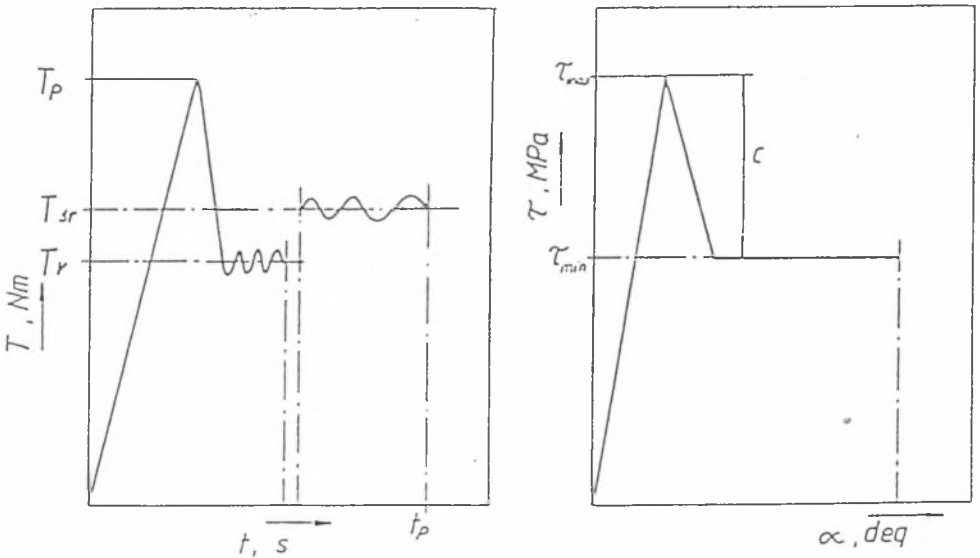
$m_2$  - masa ostrza po próbie.

Własności mechaniczne rozkruszonych minerałów w postaci granulatów reprezentuje między innymi wytrzymałość na ścinanie. Jest to maksymalna osiągnięta wartość naprężenia stycznego w danym punkcie między ziarnami minerału, po przekroczeniu którego następuje poślizg i niesprężyste przemieszczenie między dwiema strefami uziarnionego minerału - ruchomą i stacjonarną.

Wytrzymałość na ścinanie w próbce rozkruszonego minerału zależy od trzech czynników:

- tarcia ślizgowego między sąsiadującymi ziarnami,
- tarcia tocznego, jako że część ziarn przyjmie takie położenie, że będą one toczyć się po sobie,
- oporu wynikającego z akcji blokowania ruchu ziarn minerału i ścinania tych połączeń "kształtowych".

Typowy przykład zachowania się rozkruszonego minerału w próbie wytrzymałości na ścinanie, prowadzonej w czasie  $t_p$ , przedstawia rys.1. Wykres naprężenia stycznego zawiera wartość szczytową i szczytkową (minimalną). Po osiągnięciu szczytowej wartości momentu  $T_p$  następuje gwałtowne obniżenie momentu do wartości szczytkowej  $T_r$ , przy której odbywa się dalsze względne przemieszczanie ziarn minerału.



Rys. 1. Przebieg momentu obrotowego i naprężenia stycznego w czasie próby kruszenia minerału

Fig. 1. Torque diagram and schematic representation of shear stress changes during fine mineral shear - crushing action

Maksymalna wartość naprężenia ścinającego może być wyznaczona z zależności:

$$\tau_{\max} = C + \sigma_n \operatorname{tg} \phi, \quad (2)$$

w której:

$C$  - kohezja pozorna, MPa

$\sigma_n$  - naprężenie normalne, MPa

$\phi$  - kąt tarcia wewnętrznego, deg.

W próbce rozkruszonego minerału pod normalnym ciśnieniem ziarna są w stanie równowagi. Aby przemieścić je stycznie, należy pokonać opory przeciwstawiające się względnemu ruchowi ziarn. Gdy wartość szczytowa wytrzymałości na ścinanie będzie osiągnięta już przy małej wartości przemieszczenia, wiele z istniejących wiązań kształtowych zostaje przerwanych i do kontynuacji procesu ścinania potrzebna jest tylko szczątkowa wartość naprężeń ścinających.

Różnica między wartością szczytową i szczątkową naprężeń ścinających będzie stanowiła omawianą pozorną kohezję minerału  $C$ .

Zmniejszenie akcji blokowania (klinowania) spowodowane jest skruszaniem ziarn minerału oraz ich ślizganiem i toceniem.

Wartość bezwzględną oporu na ścinanie można wyrazić poprzez kąt tarcia wewnętrznego [1].

$$\phi = \arctg \frac{\tau_{\min}}{\sigma_n} = \arctg \frac{3T_r}{2RN}, \quad (3)$$

gdzie:

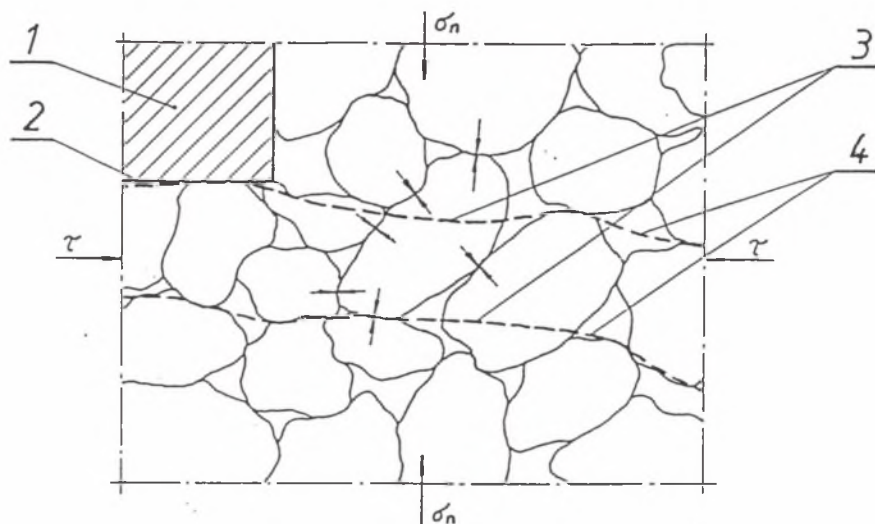
$R$  - promień dysku, m

$N$  - siła normalna nacisku, N.

Podczas mielenia ziarna minerału ulegają w mniejszym lub większym stopniu rozkruszeniu. Przygotowana próbka minerału w proponowanym aparacie otrzymuje określoną porcję energii  $E_I$ . Przebieg procesu kruszenia przedstawia rys.2.

Procesowi ścinania towarzyszy zużycie ostrza. Spowodowane jest ono przemieszczaniem się ostrza po warstwie rozkruszonego minerału. Zużycie to powodują ziarna minerału, a w szczególności twarde składniki i zanieczyszczenia. W młynie kulowym, jak również podczas laboratoryjnego eksperymentu, największe zużycie następuje w rezultacie kruszenia twardych ziarn. Zablokowane w masie rozkruszonego minerału twarde ziarna działają na ostrze jak "tarcza szlifierska",

powodując powstawanie rys i bruzd, przyczyniając się przez to do jego szybszego zużywania.



Rys. 2. Interpretacja przebiegu kruszenia:

- 1 - ostrze,
- 2 - krawędź ostrza,
- 3 - płaszczyzna ścięcia,
- 4 - płaszczyzna wzajemnego poślizgu

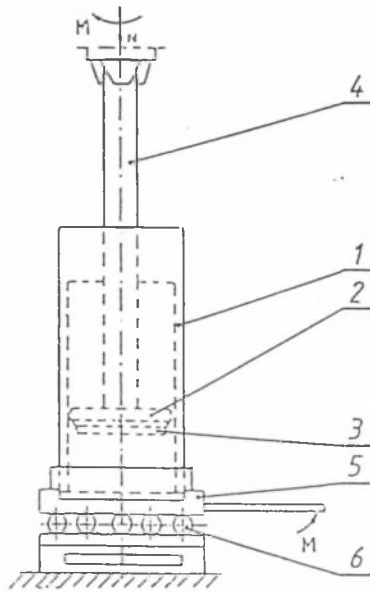
Fig. 2. Interpretation of shear-crushing action:

- 1 - blade,
- 2 - worn surface of blade,
- 3 - surface of fracture,
- 4 - plane of relative displacement

### 3. METODA BADANIA ZUŻYCIA MATERIAŁÓW KONSTRUKCYJNYCH

Opracowana metoda badawcza symuluje zużywanie się elementów maszyn urabiających, transportujących i przerobczych, a w szczególności młynów węglowych. Dotychczasowe metody nie dawały możliwości samoczynnego usuwania finalnie skruszonego minerału z przestrzeni mielenia. Upřednio w trakcie testowania laboratoryjnego cała próbka minerału poddawana była kruszeniu przez cały czas trwania testu. W przemysłowych młynach węglowych cząstki minerału są usuwane z niego tak szybko, jak tylko osiągną wymaganą wielkość. Dlatego też proponowana

metoda pozwala finalnie skruszonemu minerałowi opuścić przestrzeń mielenia przez zastosowanie odpowiedniego luzu między obracającym się dyskiem a ścianką cylindra.



Rys. 3. Przyrząd do badania zużycia materiałów konstrukcyjnych:  
 1 - cylinder,  
 2 - dysk,  
 3 - ostrze-próbka materiału,  
 4 - wałek napędowy,  
 5 - ramię pomiarowe z czujnikiem tensometrycznym,  
 6 - łożysko kulkowe wzdłużne

Fig. 3. Schematic diagram of apparatus for wear testing of materials:  
 1 - cylindrical chamber,  
 2 - disk,  
 3 - blade (materials sample),  
 4 - drive shaft,  
 5 - torque indicator,  
 6 - thrust bearing

Przyrząd stosowany w proponowanej metodzie (rys.3) składa się z obracającego się dysku, zamkniętego w cylindrycznej komorze. Obroty z maszyny napędzającej przekazywane są na dysk za pośrednictwem wałka, przez który wywierany jest również pożądany nacisk. Elementem mielącym jest zamocowane od spodu ostrze (próbka materiału). Przestrzeń między dyskiem a dnem cylindrycznej komory wypełniona jest próbką minerału (ścierniwem). W czasie próby dysk obraca się, krusząc ostrzem próbkę minerału. Mierzone są między innymi: prędkość obrotowa dysku w czasie próby, moment obrotowy oraz strata masy ostrza (próbki materiału konstrukcyjnego).

Średnica wewnętrzna cylindra wynosi  $30 \pm 0,01 \text{ mm}$ , a średnica dysku  $29,4 \pm 0,01 \text{ mm}$ . Luz między ścianką wewnętrzną cylindra a dyskiem wynosi  $0,3 \text{ mm}$ , co pozwala finalnie rozkruszonemu minerałowi opuścić przestrzeń mielenia.

W skład opracowanego stanowiska badawczego wchodzi:

- wiertarka słupowa, służąca do napędu przyrządu i do wywierania stałego nacisku na próbkę minerału,
- czujnik tensometryczny, służący do pomiaru momentu obrotowego działającego na wałek,
- tachometr, służący do pomiaru prędkości obrotowej dysku,
- mostek tensometryczny typu AT 970,
- woltomierz cyfrowy V 546,
- waga analityczna i laboratoryjna,
- opisany wcześniej przyrząd do przeprowadzenia testów.

Używane do badań ostrza (próbki materiału konstrukcyjnego) zostały dobrane w taki sposób, aby reprezentowały różne grupy stali konstrukcyjnych, narzędziowych i żeliw. Były to:

|        |  |
|--------|--|
| St 3   | - stal zwykłej jakości ogólnego przeznaczenia,       |
| 45     | - stal wyższej jakości ogólnego przeznaczenia,       |
| 40H    | - stal stopowa konstrukcyjna do ulepszenia ciepłego, |
| ŁH 15  | - stal na łożyska toczne,                            |
| NZ 2   | - stal narzędziowa stopowa do pracy na zimno,        |
| SW 12C | - stal szybko tnąca,                                 |
| Z1200  | - żeliwo szare.                                      |

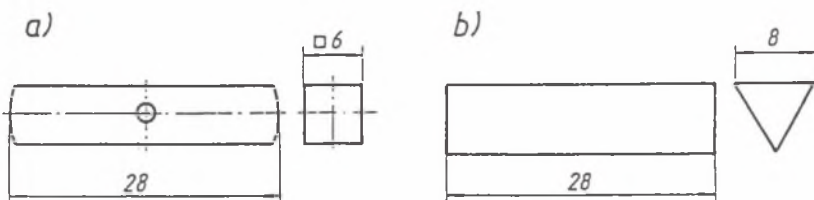
Materiały te stosowane są powszechnie na elementy maszyn, co czyni wiarygodnym cel prowadzonych badań i praktyczność interpretacji wyników.

Ostrza wykonane zostały w formie kostki prostokątnej z otworem służącym do zamocowania oraz w formie graniastosłupa o podstawie trójkąta (rys.4).

Próbką minerału był węgiel kamienny typu 31/2, charakteryzujący się dużym współczynnikiem ścieralności, co pozostaje w ścisłym związku z zawartością twardych składników (krzemionka - 7% piryt - 3%).

Badane ostrze (próbka materiału) zostało oczyszczone, zważone i zamocowane w przyrządzie. Próbkę węgla o masie  $30 \pm 0,1 \text{ g}$  i klasie ziarnowej  $0,6 \div 2 \text{ mm}$  każdorazowo wsypywano do cylindra i zamykano. Dysk obciążono siłą osiową  $N$  i wprowadzono go w ruch obrotowy. Po wykonaniu próby cały zestaw był rozmontowywany, ostrze usunięte z dysku, ochłodzone i oczyszczone w rozpuszczalniku. Różnica masy ostrza przed próbą i po próbie stanowiła ubytek masy ostrza  $\Delta W$  w mg.





Rys. 4. Ostrza-próbki materiału konstrukcyjnego:

a - prostopadłościenne

b - graniastosłupowe

Fig. 4. Materials samples-blades:

a - rectangular

b - triangular

Procedura testu dla kolejnych prób była taka sama. Badania przeprowadzono dla różnych materiałów konstrukcyjnych, powtarzając próbę kilkakrotnie, osobno dla ostrzy prostopadłościennych i graniastosłupowych. Następnie obliczano takie parametry, jak:  $\Delta W$ , EI i ostatecznie WR.

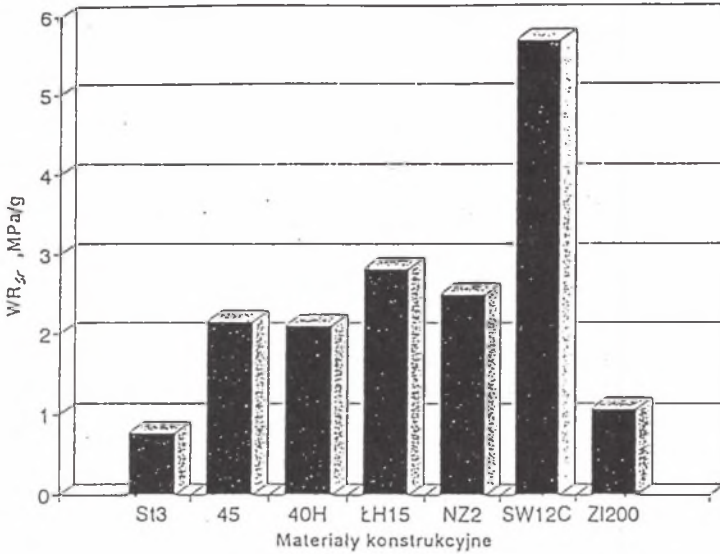
Opis procedury testu dokładnie przedstawiony jest w [3].

W celu uśrednienia wartości odporności na zużycie WR ostrza prostopadłościennego próbę powtarzano czterokrotnie dla każdego materiału konstrukcyjnego. Natomiast przy próbkach graniastosłupowych próbę prowadzono na jednej krawędzi, powtarzając ją sześciokrotnie. Podyktowane to było zmianą intensywności zużywania się ostrza i koniecznością uchwycenia zależności odporności na zużycie od numeru kolejnej próby, a więc stopnia stępienia ostrza.

Wartości średniej odporności na zużycie  $WR_{\text{sr}}$  ostrza prostopadłościennego przedstawione są graficznie na rys.5. Wartości te są wyraźnie zróżnicowane w zależności od użytego do badania materiału konstrukcyjnego.

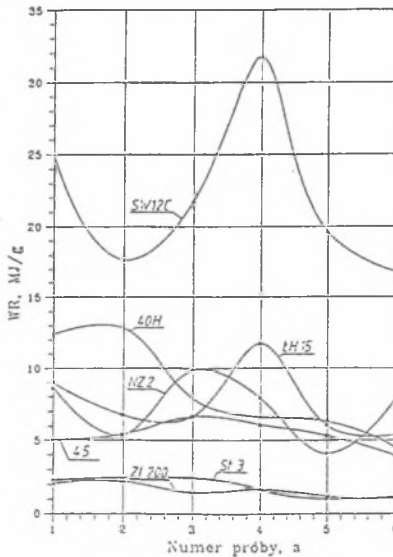
Rysunek 6 przedstawia graficznie porównanie zależności odporności na zużycie w zależności od numeru kolejnej próby dla badanych materiałów, dla próbek graniastosłupowych.

Po analizie zależności odporności na zużycie  $WR_{\text{sr}}$  próbek prostopadłościennych od twardości próbek HB możemy ją przedstawić graficznie na rys.7.



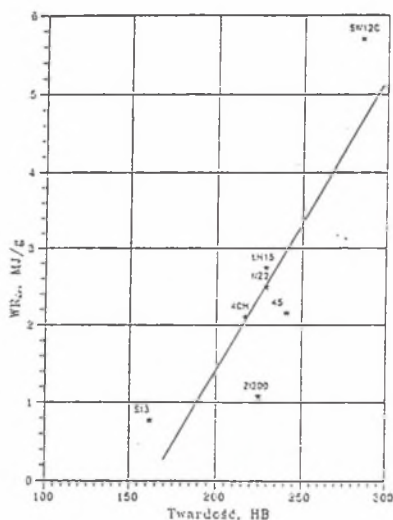
Rys. 5. Graficzne przedstawienie średniej odporności na zużycie  $WR_{sr}$  materiałów konstrukcyjnych dla ostrza prostokątnego

Fig. 5. Graphical representation of mean values of materials wear resistance  $WR_{sr}$  from tests with the rectangular blades



Rys. 6. Porównanie zależności odporności na zużycie w funkcji numeru kolejnej próby badanych materiałów dla próbek graniastosłupowych

Fig. 6. Comparison of results from materials testing with the triangular blades and the effect of a number of tests on the wear resistance



Rys. 7. Zależność  $WR_{sr}$  w funkcji twardości HB dla próbek prostokątnych  
 Fig. 7. Relation between wear resistance,  $WR_{sr}$  and hardness of materials, HB for the results from materials testing with the triangular blades

#### 4. WPŁYW STRUKTURY MATERIAŁÓW KONSTRUKCYJNYCH NA ICH ODPORNOŚĆ NA ZUŻYCIE

W celu potwierdzenia zależności między mikrostrukturą metalowych materiałów konstrukcyjnych a ich odpornością na zużycie wykonano cykl badań na wcześniej opisanym przyrządzie badawczym. Do eksperymentu włączono szereg stopów (stali i żeli) różniących się między innymi procentową zawartością węglików, ich składem chemicznym i twardością (tablice 1 i 2). Materiały te są stosowane na elementy maszyn górniczych i przerobczych [4].

Jeżeli twardość minerału (ścierniwa) jest mniejsza od twardości węglików, to zawartość węglików w stopach, ich skład chemiczny i wielkość ziarn wpływają istotnie na odporność materiału na zużycie. Niektóre dodatki stopowe, jak np. chrom, mogą promować tworzenie się twardszych od cementytu ( $Fe_3C$ ) węglików typu  $(FeCr)_7C_3$  lub  $(FeCr)_{23}C_6$ , których obecność w stopie podnosi jego odporność na

Tablica 1

## Skład i twardość badanych materiałów konstrukcyjnych

| Lp. | Materiał | Skład chemiczny |       |       |       |       |       |       |       |       | Twardość<br>HV |
|-----|----------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------------|
|     |          | C               | Cr    | Mo    | P     | S     | Si    | Mn    | Ni    | Cu    |                |
| 1   | St - 1   | 0,08            | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     | 159            |
| 2   | Z - 1    | 2,70            | 22,00 | 2,000 | 0,018 | 0,039 | 0,400 | 0,500 | 0,117 | 0,080 | 752            |
| 3   | A - 1    | 1,28            | 11,68 | 0,970 | 0,018 | 0,039 | 0,376 | 0,429 | 0,114 | 0,313 | 630            |
| 4   | B - 1    | 2,58            | 26,82 | 0,061 | 0,018 | 0,005 | 0,445 | 0,585 | 0,114 | 0,074 | 595            |
| 5   | C - 1    | 2,93            | 28,06 | 0,081 | 0,023 | 0,043 | 0,804 | 0,454 | 0,449 | 0,093 | 663            |
| 6   | D - 1    | 1,30            | 1,45  | 0,230 | 0,029 | 0,005 | 0,740 | 1,347 | 0,130 | -     | 248            |
| 7   | E - 1    | 2,74            | 27,30 | 0,075 | 0,021 | 0,030 | 0,529 | 0,727 | 0,166 | 0,093 | 679            |
| 8   | F - 1    | 0,79            | 2,19  | 0,295 | 0,017 | 0,014 | 0,461 | 0,917 | 0,254 | 0,093 | 372            |
| 9   | G - 1    | 2,53            | 23,42 | 0,510 | 0,018 | 0,035 | 0,650 | 1,050 | 0,216 | 0,168 | 532            |
| 10  | G - 2    | 2,30            | 14,35 | 2,450 | 0,018 | 0,014 | 0,515 | 0,727 | 0,125 | 0,180 | 747            |
| 11  | H - 1    | 2,58            | 28,70 | 0,138 | 0,018 | 0,024 | 0,789 | 0,442 | 0,158 | 0,112 | 670            |
| 12  | I - 1    | 2,75            | 26,20 | 0,060 | 0,020 | 0,030 | -     | 0,950 | 0,150 | 0,140 | 696            |

Tablica 2

## Mikrostruktura badanych materiałów konstrukcyjnych

| Lp. | Materiał | Osnowa    | Objętościowa<br>zawartość<br>węglików, % | Mikrotwardość ziarn węglików, HV <sub>0,25N</sub> |          |         |
|-----|----------|-----------|--|---|----------|---------|
|     |          |           |  | minimum   | maksimum | średnia |
| 1   | A - 1    | -         | -  | 1063  | 2288     | 1480    |
| 2   | B - 1    | martenzyt | 30,05                                    | 1149  | 2393     | 1604    |
| 3   | C - 1    | martenzyt | 34,04                                    | 1377  | 2896     | 2243    |
| 4   | D - 1    | austenit  | -  | -   | -        | -       |
| 5   | E - 1    | martenzyt | 24,56                                    | 1891  | 2690     | 2424    |
| 6   | G - 1    | austenit  | 27,10                                    | 919   | 2565     | 1950    |
| 7   | G - 2    | martenzyt | 15,66                                    | 2143  | 2690     | 2343    |
| 8   | H - 1    | martenzyt | 23,40                                    | 2097  | 2825     | 2584    |
| 9   | I - 1    | martenzyt | 26,18                                    | -   | -        | -       |

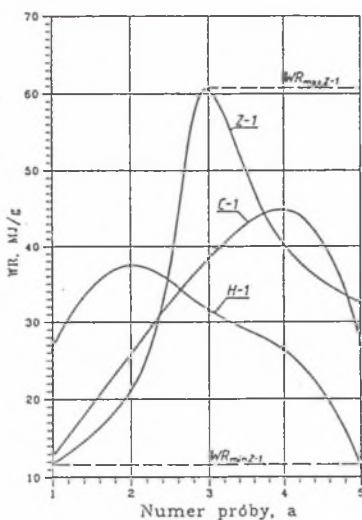
Tablica 3

Wyniki badań materiałów na zużycie ściernie

| Lp. | Materiał | 1                           |            |      | 2                           |            |       | 3                           |            |       | 4                           |            |      | 5                           |            |      |
|-----|----------|-----------------------------|------------|------|-----------------------------|------------|-------|-----------------------------|------------|-------|-----------------------------|------------|------|-----------------------------|------------|------|
|     |          | $\Delta W/i$<br>$\mu g/obr$ | WR<br>MJ/g | RWR  | $\Delta W/i$<br>$\mu g/obr$ | WR<br>MJ/g | RWR   | $\Delta W/i$<br>$\mu g/obr$ | WR<br>MJ/g | RWR   | $\Delta W/i$<br>$\mu g/obr$ | WR<br>MJ/g | RWR  | $\Delta W/i$<br>$\mu g/obr$ | WR<br>MJ/g | RWR  |
| 1   | St-1     | 25,1                        | 5,0        | 1,00 | 28,4                        | 3,5        | 1,00  | 21,8                        | 5,7        | 1,00  | 21,3                        | 6,2        | 1,00 | 23,2                        | 5,3        | 1,00 |
| 2   | Z - 1    | 9,4                         | 11,7       | 2,34 | 5,2                         | 21,1       | 6,03  | 1,8                         | 60,6       | 10,60 | 2,7                         | 40,3       | 6,50 | 3,6                         | 32,5       | 6,13 |
| 3   | A - 1    | 9,4                         | 11,7       | 2,34 | 3,0                         | 33,6       | 9,60  | 9,9                         | 11,8       | 2,07  | 4,6                         | 24,3       | 3,92 | 5,6                         | 21,0       | 3,96 |
| 4   | B - 1    | 4,6                         | 23,3       | 4,66 | 7,4                         | 13,0       | 3,71  | 2,6                         | 41,7       | 7,32  | 8,3                         | 13,0       | 2,10 | 2,2                         | 50,1       | 9,45 |
| 5   | C - 1    | 8,1                         | 12,7       | 2,54 | 4,1                         | 25,7       | 7,34  | 2,5                         | 38,4       | 6,74  | 2,4                         | 44,9       | 7,24 | 4,0                         | 27,0       | 5,09 |
| 6   | D - 1    | 6,0                         | 19,8       | 3,96 | 5,3                         | 20,3       | 5,80  | 3,9                         | 28,4       | 4,98  | 3,9                         | 29,0       | 4,68 | 5,4                         | 20,8       | 3,92 |
| 7   | E - 1    | 6,9                         | 15,9       | 3,18 | 8,8                         | 12,6       | 3,60  | 8,2                         | 14,5       | 2,54  | 3,5                         | 33,6       | 3,42 | 5,1                         | 25,9       | 4,89 |
| 8   | F - 1    | 9,8                         | 11,7       | 2,34 | 9,7                         | 11,8       | 3,37  | 6,5                         | 17,0       | 2,98  | 7,9                         | 14,0       | 2,26 | 6,2                         | 18,0       | 3,40 |
| 9   | G - 1    | 4,6                         | 24,4       | 4,88 | 5,9                         | 18,8       | 5,37  | 5,8                         | 19,6       | 3,44  | 9,0                         | 12,7       | 2,05 | 5,1                         | 22,9       | 4,32 |
| 10  | G - 2    | 5,3                         | 22,1       | 4,42 | 3,4                         | 38,7       | 11,10 | 4,4                         | 25,9       | 4,54  | 3,9                         | 27,8       | 4,48 | 7,4                         | 15,0       | 2,83 |
| 11  | H - 1    | 4,4                         | 26,4       | 5,28 | 3,1                         | 37,5       | 10,70 | 3,4                         | 31,6       | 5,54  | 3,4                         | 26,4       | 4,26 | 9,9                         | 11,3       | 2,13 |
| 12  | I - 1    | 7,9                         | 15,1       | 3,02 | 4,4                         | 27,1       | 7,74  | 5,7                         | 19,7       | 3,46  | 3,0                         | 38,3       | 6,18 | 5,9                         | 19,2       | 3,62 |

zużycie ściernie. Dodatek chromu zwiększa także odporność na korozję, a przez to obniża podatność materiału konstrukcyjnego na synergizm oddziaływań chemicznych i mechanicznych. Badania przeprowadzono wg tej samej procedury, opisaney w poprzednim rozdziale, a wyniki badań przedstawiono w tablicy 3.

Jak widać z tablicy 3, wyniki dla poszczególnych stopów, uzyskiwane w następujących po sobie próbach na tej samej próbce, różniły się znacznie między sobą. Ale tylko dla niektórych tworzyw udało się uzyskać klarowny trend zmian, polegający na ujawnieniu w pierwszej próbie względnie dużego wstępnego zużycia (mała wstępna odporność na zużycie  $WR_{min}$ ) jako rezultat odłamywania i pęknięcia próbki w strefie ostrza. Po wykruszeniu ostrza w następnej próbie zużycie było znacznie mniejsze, aby po 3 lub 4 próbie ponownie wzrastać na skutek zwiększania się powierzchni, na którą oddziaływał ściernie minerał. Ten trend zmian reprezentują materiały przedstawione na rys.8.

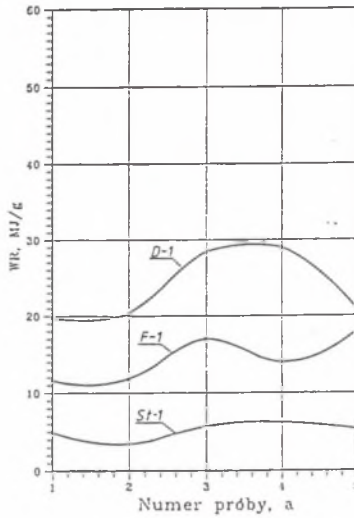


Rys. 8. Wpływ numeru próby na odporność na zużycie dla trzech materiałów wykazujących podatność na pęknięcie (wykruszanie) ostrza

Fig. 8. Effect of a number of test on the wear resistance of three brittle materials

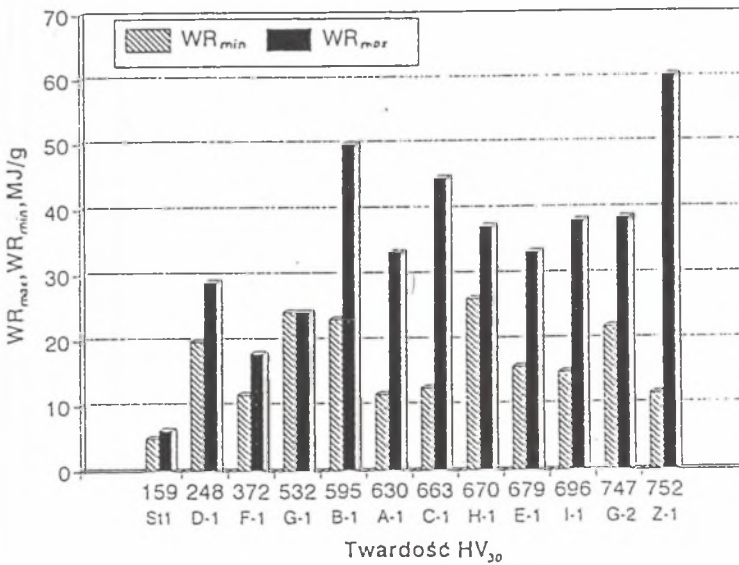
Stale o niskiej twardości (St 1) lub dobrych własnościach plastycznych (D-1, F-1) nie wykazywały wyraźnie tych trendów, gdyż brak było wpływu pęknięcia na wstępne zużycie, rys.9.

Na tych próbkach widoczne były odkształcenia plastyczne ostrza po próbie na zużycie.



Rys. 9. Wpływ numeru próby na odporność na zużycie dla trzech materiałów nie wykazujących podatności na pęknięcie (wykruszanie) ostrza

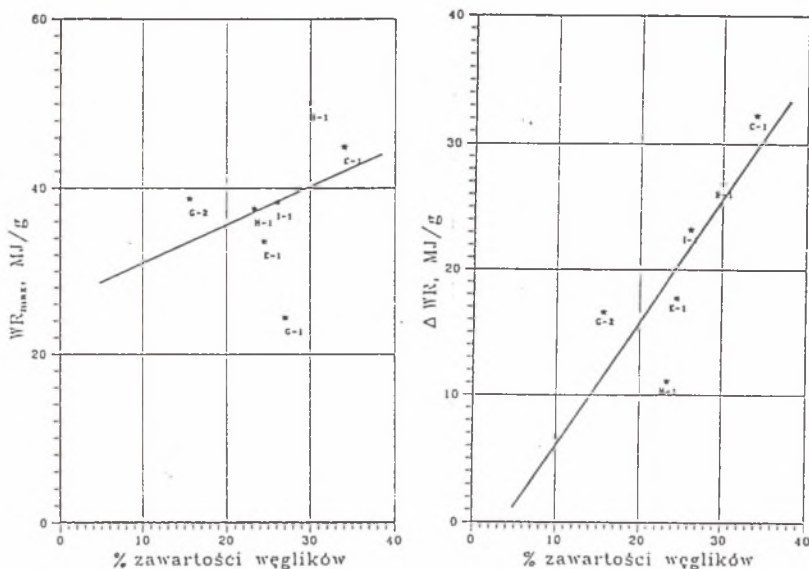
Fig. 9. Effect of a number of test on the wear resistance of three ductile materials



Rys. 10. Zależność między wstępną i maksymalną odpornością na zużycie a twardością

Fig. 10. Relation between initial, maximal wear resistance and hardness of materials

Jak widać z rys. 10, występuje ogólny trend do wzrostu maksymalnej odporności na zużycie z twardością materiału ( $HV_{30}$ ), natomiast brak jest wpływu twardości na wstępną odporność na zużycie. Potwierdza to, że w pierwszej próbie dla wielu materiałów dominuje ubytek materiału w wyniku pęknięcia (łuszczenia i odłamywania).



Rys. 11. Wpływ procentowy zawartości węglików na odporność na zużycie  
Fig. 11. Effect of carbides content on the wear resistance of materials

Wpływ procentowej zawartości węglików na odporność na zużycie przedstawiono na rys. 11. Jak można się spodziewać, im większa procentowa zawartość węglików, tym większa maksymalna odporność na zużycie, która reprezentuje odporność na zużycie ściernie, a także tym większy wstępny spadek odporności na zużycie  $\Delta WR$  (różnica między maksymalną odpornością na zużycie  $WR_{max}$ , a wstępną odpornością na zużycie  $WR_{min}$ ), który reprezentuje dominujące zużycie w wyniku pęknięcia (wykruszania) ostrza.



## 5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Konstrukcja przyrządu badawczego i procedura badań oparte zostały na zasadach podobieństwa.

Przedstawioną metodę i stanowisko badawcze stosować można do wyznaczania ścieralności dowolnego minerału sypkiego oraz do oceny odporności na zużycie dowolnych materiałów konstrukcyjnych w warunkach zużycia ściernego w obecności kruszonego minerału.

Niewątpliwą zaletą metody i przyrządu jest prostota przebiegu próby i możliwość zastosowania jako maszyny napędzającej i dającej odpowiedni nacisk wiertarki stołowej.

Przedstawiony przyrząd ma możliwość modelowania pracy różnego typu maszyn - nie tylko górniczych. Wyraża się to w możliwości zmiany: badanych materiałów, prędkości obrotowej, nacisków przyłożonych do próbki, szybkości opuszczania przestrzeni mielenia przez finalnie rozkruszony minerał poprzez regulację szczeliny między cylindrem a dyskiem, itd.

W rezultacie analizy wyników testów można wyznaczyć zależność między średnią odpornością na zużycie  $WR_{sr}$  próbek prostopadłościennych a twardością HB badanych materiałów. Materiały o wysokich własnościach wytrzymałościowych, o dużej twardości, charakteryzowały się wysoką odpornością na zużycie WR (SW 12C, NZ 2, LH 15).

Badania zużycia na próbkach graniastosłupowych o przekroju trójkątnym, w którym ostrze poddane jest największym oddziaływaniom mechanicznym, pozwalają na realizację złożonego stanu obciążeń materiału próbki, wywołującego jego ubytek w wyniku procesu pęknięcia (wykruszania) ostrza, jak również w wyniku bruzdowania i rysowania powierzchni ostrza przez ziarna minerału. Wzajemny udział tych dwóch mechanizmów zużycia może być ujawniony w cyklu pięciu lub sześciu kolejno powtarzanych prób z tą samą próbką materiału.

Jest możliwe, że w rezultacie dokładnego sprecyzowania warunków badań i sposobu przygotowania próbek otrzymamy narzędzie do jednoczesnego wyznaczenia parametrów charakteryzujących odporność na zużycie ściernie i odporność na kruche pęknięcie materiałów konstrukcyjnych.

Badania nad procesami zużycia w tych specyficznych warunkach będą dalej kontynuowane i uwzględnić powinny szereg dodatkowych czynników, takich jak: rodzaj minerału (ścierniwa, węgla), stopień rozdrobienia, temperaturę oraz inne grupy materiałów konstrukcyjnych.

## LITERATURA

- [1] Ścieszka S.F.: A technique to investigate pulverizing properties of coal. Powder Technology 1985, Vol.43, nr 1
- [2] Ścieszka S.F., Dutkiewicz R.: Testing abrasive wear in mineral comminution. International Journal of Mineral Processing 1991, Vol.32, s.81-109
- [3] Filipowicz K.: Badanie odporności na zużycie materiałów konstrukcyjnych. Praca naukowo-badawcza. Instytut Mechanizacji Górnictwa, Politechnika Śląska Gliwice 1992
- [4] Skorupa J.: Wear of tube mill liners for South African power industry. PhD Thesis, 1989, Cape Town University

Recenzent: Prof. dr hab. inż. **Jan BROŚ**

Wpłynęło do Redakcji w kwietniu 1994 r.

### Abstract

A apparatus has been developed to study the abrasive wear resistance of materials in sliding contact with solid mineral particles. The apparatus has a wide pressure and velocity range, and can be used to simulate the tribological conditions in mining and mineral processing machinery. Using the apparatus, a number of different materials have been tested and classified according to their resistance to abrasive wear in rubbing contact with particulate coal. The investigation was divided into two parts, in each part a different shape of grinding blade (testing material) was used in order to focus attention on the different wear phenomena. Tests with triangular blades can provide useful information about the wear properties of various materials including information about the contribution of the brittle fracture of the sharp edges and asperities to the total wear of blade.