

Stanisław F. ŚCIESZKA

## PROBLEMY TRIBOLOGICZNE W TECHNICIE GÓRNICZEJ

**Streszczenie.** Przedstawiono niektóre problemy tribologiczne, jakie ujawniły się w przemyśle górniczym. Przykłady ilustrujące te problemy obejmują rozwój materiałów na narzędzia urabiające, rynny przenośników zgrzebłowych, ślizgacze sań kombajnowych oraz wykładziny rur, zbiorników i zsuwni w zakładach przeróbki węgla.

## TRIBOLOGICAL PROBLEMS IN THE MINING TECHNOLOGY

**Summary.** Some tribological problems which have arisen in the mining industry are described. The examples given include development of mineral cutting tools materials, face conveyor line pans, shearer underframe shoes and coal preparation plant pipe, bunker and chute linings.

## ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ В ГОРНОЙ ТЕХНИКЕ

**Резюме.** Представлены определенные трибологические проблемы выступающие в горной промышленности. Примеры, иллюстрирующие эти проблемы, охватывают развитие материалов для очистного оборудования, рештаков скребковых конвейеров, рабочих поверхностей комбайновых саней а также облицовка труб, спусков и сборников в обогатительных фабриках.

### 1. WPROWADZENIE

Środowisko górnicze, a w szczególności środowisko w kopalniach o dużej głębokości, zawsze sprawiało problemy użytkownikom urządzeń tam pracujących. Większość tych problemów można zakwalifikować jako tribologiczne, gdyż ujawniają się w postaci nadmiernego i przedwczesnego zużycia elementów maszyn w wyniku agresywnego mechanicznego i chemicznego oddziaływania środowiska. Problemy te narastają, co sygnalizują raporty i publikacje z wielu krajów [1, 2], gdyż wprowadzane są do produkcji coraz liczniej, coraz bardziej skomplikowane i coraz droższe systemy maszynowe do urabiania, ładowania transportu i przeróbki minerałów. Istotnym utrudnieniem dla rozwiązujących te problemy konstruktorów jest fakt, że nadrzędnym ich zadaniem jest obniżenie kosztów produkcji górniczej, a nie podniesienie trwałości i niezawodności maszyny lub jej elementów. Inne czynniki ograniczające swobodę procesu konstruowania to specyficzne wymagania związane z bezpieczeństwem, jak np.: niepalność, nietoksyczność materiałów lub ograniczenia gabarytowe.

Walka z zużyciem maszyn i urządzeń górniczych prowadzona jest na wielu "frontach" i niniejsza publikacja jest próbą skondensowanego przedstawienia przeglądu literatury omawiającej wybrane, najczęściej poruszane w niej problemy.

## 2. MATERIAŁY NA NARZĘDZIA URABIAJĄCE

Ze względu na dominujący rodzaj oddziaływań między narzędziem (lub jego ostrzem) a skałą w procesie jej urabiania lub rozluźniania oraz ze względu na wynikające z tych oddziaływań wymagania stawiane materiałom można te narzędzia podzielić na wiertła, noże kombajnów chodnikowych i ścianowych oraz ostrza i krawędzie łyżek koparek różnych konstrukcji.

Końcówki noży i wiertel wykonuje się obecnie najczęściej z węglików wolframu w osnowie kobaltowej, (WC+Co), [3].

W procesie oddziaływania ze skałą końcówki te ulegają procesowi degradacji, który daje się rozdzielić na cztery mechanizmy [4]:

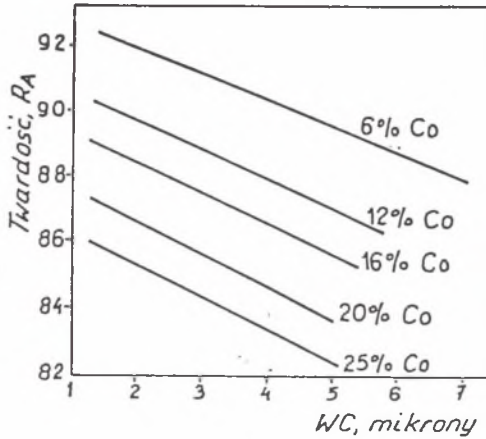
- mikroskrawanie i mikrobruzdowanie,
- mikroodpryski i łuszczenie,
- termiczne zmęczenie i pękanie,
- chemiczne reakcje z otoczeniem.

Próby obniżania udziału jednego z mechanizmów np. poprzez zmianę składu chemicznego lub ziarnowego węglików powoduje zwiększenie udziału pozostałych mechanizmów w procesie zużycia. Typowy przykład to optymalizacja zawartości lepiszcza kobaltowego w kompozycie. Dąży się do osiągnięcia jak największej twardości kompozytu poprzez obniżenie zawartości kobaltu i wielkości ziarn WC, gdyż to obniża zużycie ściernie (rys.1 i 2). To działanie jednak zawsze oznacza obniżenie odporności kompozytu na pękanie i zwiększenie prawdopodobieństwa jego wystąpienia (rys.3).

Mikroodpryski i łuszczenie są rezultatem niekorzystnej dynamiki wzajemnych oddziaływań między powierzchnią ostrza i skałą. Dla noża kombajnowego te oddziaływania oznaczają generowanie fali wywołującej zmienne naprężenia rozciągająco-ściskające, a w konsekwencji zmęczeniowe pękanie WC.

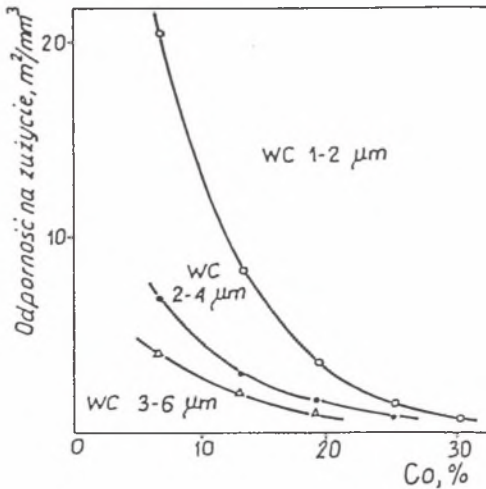
Chociaż węglik wolframu jest materiałem o dobrej odporności na zmęczenie termiczne, to zdarzają się objawy tego typu zmęczenia na powierzchniach węglików, szczególnie w przypadku urabiania skał o niskiej ścierności. Mechanizm ten może prowadzić do pęknięć i zniszczenia ostrza, jeśli niewystarczająca ilość wody chłodzącej jest doprowadzana do strefy urabiania. Na powierzchni styku noża, np. z piaskowcem, mierzono temperaturę powyżej 1250°C, gdy proces skrawania odbywał się na sucho [1]. A wiadomo, że maksymalna temperatura w strefach rzeczywistego

styku mogła być faktycznie jeszcze wyższa od temperatury rejestrowanej. Tymczasem twardość węglików wolframu obniża się istotnie ze wzrostem temperatury (rys.4) i już



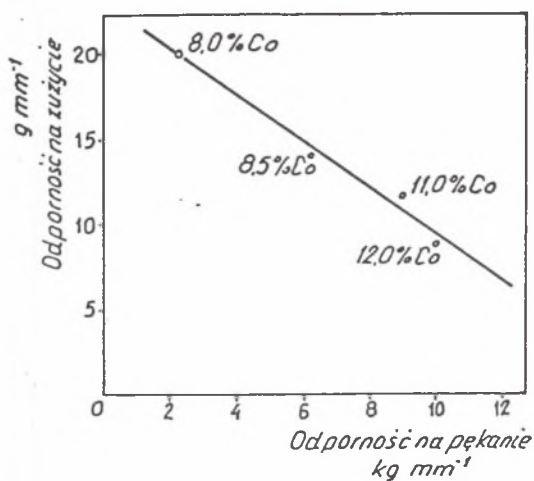
Rys. 1. Twardość Rockwella kompozytu WC-Co w zależności od wielkości ziarn WC oraz zawartości kobaltu Co

Fig. 1. Rockwell hardness of WC-Co alloys changes with WC grain size and cobalt content



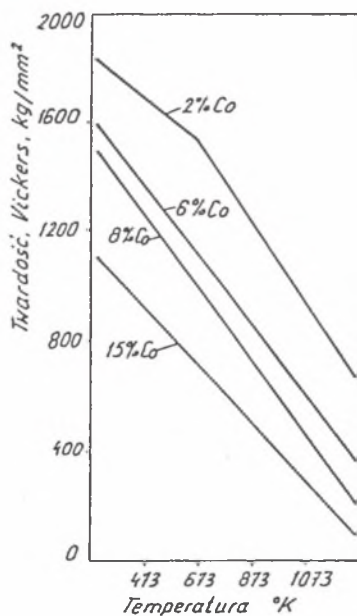
Rys. 2. Odporność na zużycie kompozytu WC-Co w zależności od wielkości ziarn WC oraz zawartości kobaltu Co

Fig. 2. Wear resistance of WC-Co alloys changes with WC grain size and cobalt content



Rys. 3. Zależność między odpornością na zużycie i odpornością na pękanie dla czterech kompozytów WC-Co o różnej zawartości kobaltu

Fig. 3. The relation between crack resistance and abrasion resistance for WC-Co composites with different cobalt content

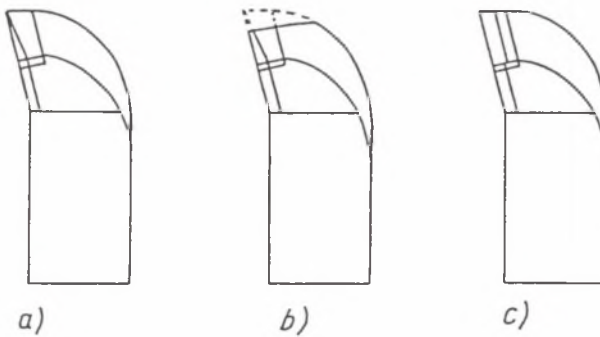


Rys. 4. Zależność twardości kompozytów WC-Co od temperatury

Fig. 4. Vickers hardness changes with temperature

w temperaturze około 400°C jest ona mniejsza od twardości kwarcu, co prowadzi do wzrostu intensywności zużycia ściernego noża.

Proces urabiania skały i proces zużycia noża (narzędzia) są ze sobą wzajemnie powiązane. Próba rozwiązania problemu, np. geometrii noża kombajnowego lub doboru materiału na ostrze, wymaga ujęcia systemowego problemu, czyli uwzględnienia wielu czynników wpływających na ww. procesy. Czynniki te, to np.: wytrzymałość skały na ściskanie, udział minerałów twardych i ich uziarnienie (wielkość, kształt), grubość pokładu i jego uławiczenie, geometria bębna urabiającego, ułożenie noży, prędkość obrotowa bębna, prędkość przesuwu kombajnu itd. Ta dalece niepełna lista czynników wykazuje, że dalsze doskonalenie (np. zwiększenie trwałości) ostrza noży kombajnowych będzie wymagało zawężenia ich zastosowań do specyficznych warunków, tak jak to ma miejsce w przypadku noży do obróbki skrawaniem [5]. Aktualne tendencje rozwoju narzędzi górniczych wykazują ukierunkowanie na coraz węższą ich "specjalizację" i coraz bardziej złożony skład ostrzy urabiających (rys.5), w których kompozyt WC+Co chroniony jest przez



Rys. 5. Nóż kombajnowy:  
 a - konfiguracja podstawowa,  
 b - zmiany profilu ostrza w wyniku zużycia,  
 c - konfiguracja z powłoką ochronną

Fig. 5. Shearer picks:  
 a - basic configurations,  
 b - profile changes as result of wear  
 c - configuration with an additional hard insert

jeszcze twardszą wielowarstwową nakładkę (powłokę) ceramiczną lub diamentową (tablica 1).

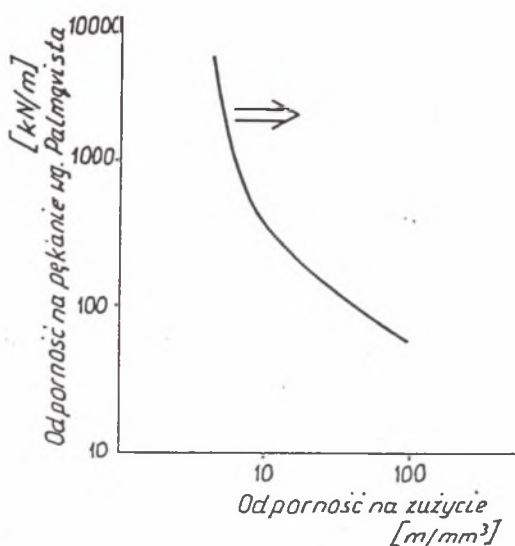
Tablica 1  
Mikrotwardość materiałów typowych powłok utwardzających w, GPa

	Węglik	Azotek	Borek
Bor	BC - 37		
Hafn	HfC - 23-26	HfN - 16,4	HfB <sub>2</sub> - 22-29
Niob	NbC - 24-28	Nb <sub>2</sub> N - 17,2	NbB <sub>2</sub> - 21-24
Tytan	TiC - 20-32	TiN - 12-20	TiB - 22-35
Wanad	VC - 24-31	VN - 15-19	VB - 20-29
Cyrkon	ZrC - 23-26	ZrN - 11,5	ZrB <sub>2</sub> - 22-56

Chociaż na ogół węgliki wolframu dobrze spełniają swoje zadanie, to ciągle podejmowane są próby znalezienia materiałów trwalszych dla szczególnie ciężkich warunków skrawania. Prowadzone są także badania dla ustalenia szybkiej metodyki badania tego typu materiałów. Bazując na fakcie występowania dwóch podstawowych mechanizmów niszczenia węglików, czyli zużycia ściernego i pęknięcia Yardley [2] zaleca osobne badania odporności na zużycie i badania odporności na pęknięcie oparte na metodyce Palmqvista [6], w której piramidka twardościomierza Vickersa służy do wywoływania pęknięć w badanym materiale. Odporność na pęknięcie wg Palmqvista (W) liczy się jako stosunek obciążenia P piramidki do długości czterech pęknięć (l) rozchodzących się z rogów odcisku:  $W = P/l$  [kN/m]. Do badań odporności na zużycie szczególnie dogodna jest metoda [8], w której można łatwo zmieniać minerał (ścierniwo) i materiał badany.

Badania ruchowe noży wykazują, że pęknięcia w większości przypadków eliminują nóż z eksploatacji, zużycie natomiast stopniowo i progresywnie zmniejsza efektywność skrawania. Czyli odporność na pęknięcie jest własnością podstawową, jest ona także trudniejsza do sterowania i kontroli, gdyż np. już obecność drobnych defektów mikrostrukturalnych istotnie wpływa na inicjowanie i propagację pęknięć, gdy tymczasem odporność na zużycie w takim przypadku pozostaje bez zmian. Stąd aktualny trend do tworzenia na bazie odpornych na pęknięcie materiałów (np. WC+Co o odpowiednim składzie) wielowarstwowo powłok superodpornych na zużycie, chroniących geometrię ostrza noża (rys.6).



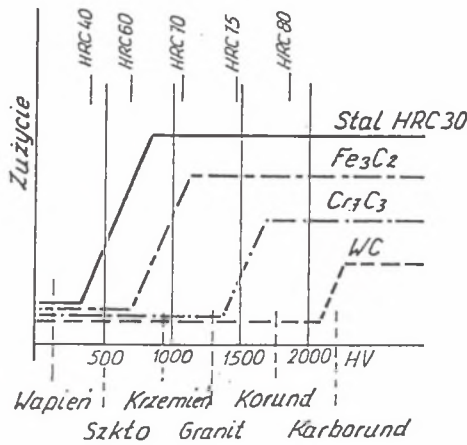


Rys. 6. Zależność między odpornością na pęknięcie i odpornością na zużycie i spodziewany kierunek zmian własności dla nowych kompozytów

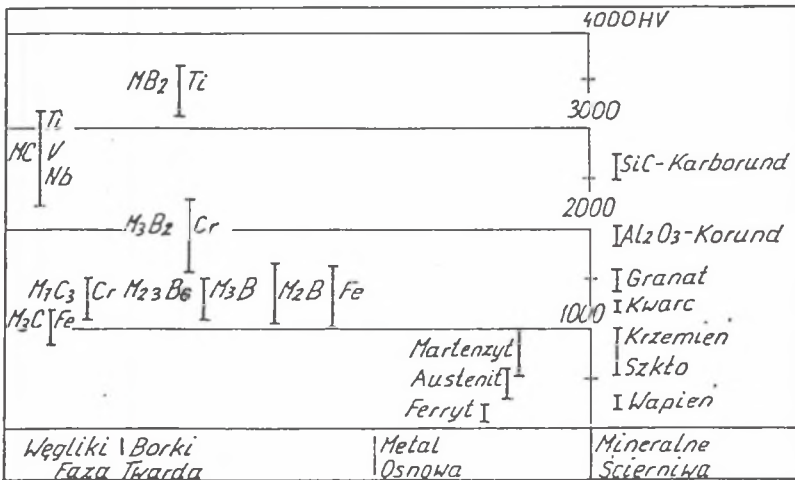
Fig. 6. The relation between crack resistance and wear resistance and anticipated direction of new composite's properties change

Na ostrza i krawędzie łyżek koparek w systemach wydobywczych metodami odkrywcowymi oddziałują w czasie pracy ziarna o różnej wielkości i ostrych krawędziach, gdyż dopiero co zostały oderwane od calizny pokładu. Oddziaływania te mają charakter dynamicznego, złożonego, wysokonapężeniowego ścierania, w którym parametry opisujące obciążenie i względny ruch ulegają ciągłym zmianom. Utrata ostrości przez krawędzie narzędzi to nie tylko obniżenie sprawności procesu urabiania, ale także progresywne przyspieszenie procesu zużycia. Dominujące zużycie ściernie pozwala na wykorzystanie upraszczającej problem zasady, że zużycie materiału zależy od stosunku twardości ścierniwa do twardości materiału (rys.7). Stąd szczególne znaczenie supertwardych warstw (o grubości do  $10\mu\text{m}$ ) napawanych na powierzchni ostrz i krawędzi. Dobre rezultaty poprawy trwałości dają warstwy ze stopu Fe-Cr-C z dodatkiem 7% Nb i 7% V oraz ze stopu Fe-Cr-(C+B), w którym występują bardzo twarde, ochraniające powierzchnię borki typu  $\text{M}_2\text{B}$  lub  $\text{M}_3\text{B}_2$  [2] (rys.8).





Rys. 7. Uproszczony wykres zależności zużycia materiału od twardości ścierniwa  
 Fig. 7. Simplified graph of material wear versus abrasant hardness



Rys. 8. Porównanie twardości niektórych minerałów z twardością faz twardych stopów i kompozytów

Fig. 8. Comparison between some minerals hardness and some alloys hard phase hardness

### 3. MATERIAŁY I POWŁOKI OCHRONNE DLA SYSTEMÓW TECHNOLOGICZNYCH W GÓRNICTWIE

Wiele elementów systemów technologicznych w górnictwie, np. transportowych, takich jak: rynny, taśmy, rury, zsuwnie, przesypy, zbiorniki itd. poddanych jest bezpośrednim oddziaływaniom silnie ściernych minerałów lub ich zawiesin w wodzie. Oddziaływania te mogą mieć charakter udarowo-erozyjny lub ślizgowo-ścierny. Walka z zużyciem w tych układach powinna być prowadzona już na etapie projektowania przez np. ograniczenie prędkości, przyspieszenia oraz przez zmianę kierunku przepływu masy urobku w celu ograniczenia udaru itd. W instalacjach brytyjskich przyjmuje się np. prędkość przepływu zawiesin i szlamów w zakresie  $1,5 \div 2,5$  m/s. Dolną granicę ustalono dla zapobiegania osadzania się minerału w przewodzie, a górną dla ograniczenia zużycia ścierno-erozyjnego. Ograniczenie udaru i przyspieszenia dotyczy punktów załadowniczych przenośników taśmowych. Urobek powinien być podawany w kierunku jego dalszego transportu. A jeżeli elementem pośredniczącym jest zbiornik, to nigdy nie powinien on zostawać pusty po to, aby urobek miał jak najkrótszą drogę wolnego spadku i nie uderzał bezpośrednio w ścianki zbiornika. Proces przepływu urobku powinien gwarantować, że we wszystkich miejscach spadku i udaru będzie obecna ochraniająca warstwa minerału.

Jeżeli zawodzą metody konstrukcyjne, problemy tribologiczne można próbować rozwiązać przez zmianę materiałów. Szczególnie intrygujące są doświadczenia z materiałami takimi, jak: poliuretan, guma, polietylen, epoksydy i materiały ceramiczne, w których wykorzystuje się ich szczególne własności, jak: niski współczynnik tarcia, odporność na zużycie ściernie, erozyjne, korozyjne i udar.

#### Polietylen

Polietylen (UHMWPE) jest doskonałym materiałem na wykładziny zbiorników i zsypani do transportu mokrego i drobnego węgla. Materiał ten, posiadając niski współczynnik tarcia, gwarantuje ciągłość przepływu granulatu węgla. Jeżeli wielkość ziarn jest mniejsza od 50 mm i nie zawierają one twardych i ostrych zanieczyszczeń, to polietylen wykazuje dużą odporność na zużycie i udar. W jednym zakładzie przeróbki węgla w Anglii zastąpiono rury stalowe rurami wykonywanymi z polietylenu (HDPE), uzyskując istotną oszczędność kosztów inwestycyjnych i przedłużenie trwałości, np. kolanek w przewodzie o średnicy  $\varnothing 250$  z czterech do czterdziestu miesięcy.

## Poliuretan

Rury stalowe z wykładziną poliuretanową z powodzeniem zastępują rury stalowe z wykładziną bazaltową do transportu nawet najtwardszych minerałów. Najczęściej stosowane są wykładziny o grubości 6,3 mm z poliuretanu o twardości Shore'a około 85° i minimalnej odporności na rozciąganie około 36 MPa. Dla każdego jednak specyficznego zastosowania powinny zostać dobrane optymalne własności poliuretanu oraz grubości wykładziny. Badania porównawcze na kopalni Hordem w Wielkiej Brytanii wykazały, że ubytek 1 mm grubości rury z wykładziną poliuretanową następuje po przetransportowaniu 102000 ton odpadów mineralnych dla rury bez wykładziny po 13000 ton, a z wykładziną bazaltową po 24000 ton. Odpady mineralne (głównie łupki) o wielkości ziarn do 38 mm były pompowane z prędkością 4 m/s i z natężeniem przepływu minerału 140 t/godz.

Wykorzystując doskonałą odporność poliuretanu na zużycie ściernie, erozyjne i korozyjne produkowane są z niego elementy maszyn takich, jak: flotowniki mechaniczne, separatory, pompy, oddzielacze odśrodkowe, płuczki itd. Elementy wykonane ze stali zwykłej jakości pokryte powłokami z poliuretanu okazały się tańsze i trwalsze od elementów wykonanych z żeliwa stopowego typu Ni-Hard lub pokrytych powłokami bazaltowymi.

## Ceramiki

We wszystkich miejscach, w których występuje silne oddziaływanie ściernie-erozyjne, umiarkowany udar cząstek minerałów oraz wysoka temperatura otoczenia na okładziny ochronne w postaci płytek nadaje się  $Al_2O_3$ , korund. Płytki korundowe spełniają doskonale rolę okładzin ochronnych w zsykach, kanałach transportowych, np. między młynami węglowymi i kotłami oraz w różnego typu dyszach, gdzie spodziewana jest intensywna erozja i kawitacja. Płytki korundowe są około 6-krotnie droższe od bazaltowych i 1,2 razy droższe od płytek z żeliwa typu Ni-Hard. Stąd każde ich zastosowanie musi być poprzedzone dokładną analizą kosztów.

#### 4. WYBRANE PROBLEMY DOBORU MATERIAŁÓW KONSTRUKCYJNYCH NA ELEMENTY KOMPLEKSÓW ŚCIANOWYCH

Niesmarowane węzły tarcia w maszynach górniczych stwarzają problemy związane ze stratami energii i stratami materiałów w wyniku zużycia. Każdy węzeł tarcia ma swoją, inną od pozostałych, specyfikę i z reguły dla każdego z nich inna konfiguracja materiałów okazuje się optymalna. Dwa wybrane węzły tarcia poddane analizie to układ: ślizgacz kombajnu ścianowego - rynna oraz rynna - łańcuch w przenośniku ścianowym [2]:

##### Układ ślizgacz-rynna

Dla zmniejszenia zużycia w tej parze ciernej postanowiono przebadać szereg warstw napawanych z przeznaczeniem na ślizgacze w płozach kombajnowych. Wyniki badań przeprowadzonych na stanowisku laboratoryjnym symulującym przesuw kombajnu przedstawiono w tablicy 2.

Tablica 2

Wyniki badań zużycia powłok na ślizgacze kombajnowe

Oznaczenie warstwy napawanej	Typ materiału	Twardość warstwy napawanej	Współczynnik tarcia		Zużycie po przesuwie wzdłuż ściany	
			min	max	ślizgacz μm	rynna μm
A	Stal martenzytyczna	400	-	0,33	19,0	0,036
B1	Stal martenzytyczna	600	0,21	0,26	9,6	0,049
C1	Stal martenzytyczna	800	0,20	0,25	5,7	0,025
D1	Żeliwo chromowe	800	0,25	0,27	5,8	0,110
E	Żeliwo chromowe	700	0,32	0,37	6,7	0,235
F	Stal manganowa	290	0,24	0,40	21,5	0,605
G1	Borki chromu	1000	0,23	0,29	1,7	0,640

Z tablicy 2 wynika, że materiał typu A i F można odrzucić, gdyż są one mniej odporne na zużycie od obecnie stosowanego materiału typu B. Ostateczny wybór materiału na ślizgacz i sposób jego nakładania musi być poprzedzony analizą ekonomiczną przedsięwzięcia.

### Układ rynnna-łańcuch

Przenośnik zgrzeblowy zajmuje funkcjonalnie centralną pozycję w układzie kompleksu ścianowego łącząc kombajn z obudową zmechanizowaną. Trwałość elementów tego systemu powinna być nie mniejsza od czasu istnienia ściany węglowej jako jednostki produkcyjnej. W Anglii dokonano modyfikacji istniejącego przenośnika w celu podwyższenia jego trwałości do spodziewanego wydobycia ze ściany, czyli około 3,5 mln ton węgla. Ponieważ średnia zdolność transportowa przenośnika standardowego wynosi 0,75 mln ton, dokonano zmiany materiału, grubości profili bocznych i blachy dennej. W tym nowym rozwiązaniu profile boczne były odlewane ze staliwa stopowego manganowego. Dwukrotnie zwiększono grubość blachy dennej oraz zwiększono jej twardość do 360 HB przez zastosowanie dodatków stopowych. Koszt trasy nowego przenośnika był czterokrotnie większy od rozwiązania standardowego, ale zakładając, że osiągnięto zamierzony cel, to spodziewane zyski ponad dziesięciokrotnie przewyższają koszt przenośnika.

## 5. PODSUMOWANIE

W wielu, typowych dla górnictwa węglowego, niesmarowanych węzłach tarcia o intensywności zużycia decydują cząsteczki minerałów występujące w roli ścierniwa oraz środowisko korozyjne. Inne parametry tribologiczne to prędkość prześlizgu, o względnie niskiej wartości oraz trudne do zdefiniowania chwilowe obciążenie powierzchniowe. Nie dające się jednoznacznie opisać warunki tribologiczne stwarzają problemy przy interpretacji wyników badań tribologicznych. W każdym przypadku wątpliwości budzi ekstrapolacja wyników z badań laboratoryjnych i przyśpieszonych na obiekty przemysłowe. Tym bardziej, że każdy przypadek jest inny, np. każdy pokład różni się wieloma parametrami od wszystkich pozostałych. Próby przewidywania efektów ekonomicznych związanych z decyzjami o zmianach materiałów lub technologii wykonania elementów obarczane są dużym błędem.

Rozwiązywanie tego dylematu wymaga systemowego podejścia do badań, ale oznacza to droższe i dłuższe badania.

Już skrótowo i selektywnie przedstawione przykłady kierunków prac badawczych, których zadaniem była poprawa trwałości elementów maszyn górniczych, odsłania ważkość prawidłowego wykorzystania wiedzy tribologicznej o zjawiskach i materiałach. Prawdopodobnie najbardziej owocny kierunek badań nad materiałami odpornymi na zużycie (zniszczenie) dla maszyn górniczych to próby podwyższenia odporności na kruche pękanie już istniejących odpornych na zużycie ściernych materiałów, takich jak węglików wolframu i innych materiałów, jak ceramiki, a przede wszystkim austenitycznych żeliw ciągliwych (ADI) [7].

## LITERATURA

- [1] Moreton G., Yardley E.D.: Tribological problems in the coal mining industry - Some case histories, *Wear*, (1980) 64 s.101-113
- [2] Materiały Konferencji Międzynarodowej pt.: "War on Wear", 17-19.09.1984. Nottingham
- [3] Clark G.G.: Principles of rock drilling and bit wear, *Colorado SOM Quarterly*, vol 77, 1982 N.2, s.1-35
- [4] Larsen-Basse J.: Abrasive wear of tungsten carbide - cobalt composites. *Materials Science and Engineering*, (1974) 13 s.83-91
- [5] Peterson M.B., Winer W.O.: *Wear Control Handbook*, ASME, New York, 1980
- [6] Palmqvist S.: Method att besamma segheten hos sproda material, sarskilt hardmetaller, *Jernkontorets Ann*, 1957 vol.141, s.300
- [7] Durman R.W.: Progress in abrasion - resistant materials for use in comminution proceses, *International Journal of Mineral Processing*, (1988) 22 s.381-399
- [8] Ścieszka S.F.: A technique to study abrasive wear in contacts with particular materials, *Wear*, (1987) 119, s.237-249

Recenzent: Prof.dr hab.inż. Jan BROS

Wpłynęło do Redakcji w marcu 1994 r.

## Abstract

Some tribological problems which have arisen in the mining industry are described. The problems are varied and reflect the diverse nature of the mining environment. The examples given include development of mineral cutting tools materials, face conveyor line pans, shearer underframe shoes and coal preparation plant pipe, bunker and chute linings.

A significant cost item in mining is due to the pick consumption of shearers and the down-time due to pick changes. It appears that further attention should be given to improved insert materials that would improve pick life. Tungsten - Carbide inserts are generally used and the use of an additional hard insert would maintain the correct pick shape and increase pick life. Possibly some new development of the composites with high resistance to crack propagation as well as abrasion would be suitable for these duties.

The paper describes as well ways of combating wear in coal preparation plant by selection of materials to resist wear, with emphasis on nontraditional materials such as polyethylenes, alumina ceramics, polyurethanes, rubbers and epoxies. While no single material will satisfy all demands such as low frictional resistance, and a high resistance to sliding abrasion, impact, erosion and corrosion it is possible to provide a concise range of materials that enable the designer to select the correct material to suit the conditions at each location within the plant with regard to reliability and overall cost effectiveness.