

Stanisław ŚCIESZKA, Wojciech GRZEGORZEK, Marcei ŻOŁNIERZ  
Politechnika Śląska, Gliwice

## MATERIAŁY NA ELEMENTY URZĄDZEŃ GÓRNICZYCH ODPORNE NA ZUŻYCIĘ – TRENDY ROZWOJU I PODSTAWY SELEKCJI

**Streszczenie.** W artykule dokonano przeglądu odpornych na zużycie materiałów metalowych, ceramicznych i elastomerów, które zostały opracowane lub zaadoptowane na potrzeby górnictwa oraz przeróbki mechanicznej minerałów. W zarysie przedstawiono skład i morfologię takich materiałów, jak: żeliwa stopowe, materiały ceramiczne, węgliki spiekane, kauczuki i poliuretany. Na wybranym przykładzie pokazano wpływ cech konstrukcyjnych tribosystemu na intensywność zużycia jego elementów. Przedstawiono także wyniki badań eksploatacyjnych żeliw stopowych i wpływ ich składu chemicznego na trwałość.

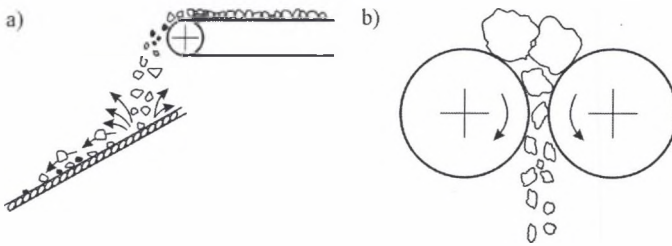
## WEAR – RESISTANT MATERIALS IN MINING INDUSTRY – DEVELOPMENT TRENDS AND SELECTION

**Summary.** Wear – resistant metallic, ceramic and elastomeric materials developed or adopted for use in the mining and mineral processing industries are reviewed. Composition and morphology of white cast irons ceramics, hardmetals and elastomers such as natural and synthetic rubbers and polyurethanes are described. The effect of tribosystem design on wear rate is shown. The results from field testing the abrasive wear resistance of several cast irons alloyed with different elements are presented.

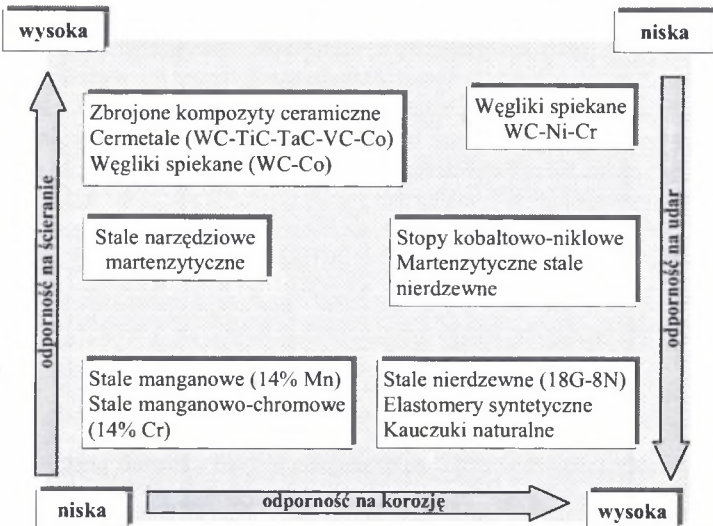
### 1. Wprowadzenie

Praktyka działalności górniczej i doświadczenia z przeróbki mechanicznej minerałów wskazują, że elementy maszyn i urządzeń pracujące w tych działach gospodarki narażone są na wyjątkowo agresywne oddziaływanie środowiska pracy, przede wszystkim o charakterze mechanicznym, ale także chemicznym i cieplnym. Większość materiałów charakteryzuje się wysoką twardością i agresywnością ścierną, co stwarza problemy w trakcie ich urabiania, transportu i przeróbki.

W wymienionych procesach technologicznych występują różne mechanizmy zużywania urządzeń, które wymagają bardzo zróżnicowanych działań w celu ograniczenia ich intensywności. Elementy urządzeń, które poddawane są bezpośrednim uderzeniom przez transportowany urobek (rys.1a), powinny być wykonane z materiałów o dużej ciągliwości oraz utwardzających się przez zgniot. Transport urobku wzdłuż zsuwni i podajników wymaga materiałów o dużej twardości powierzchniowej, natomiast kruszenie i mielenie minerałów wymaga materiałów o najwyższej twardości, ale także dużej odporności na udar i kruche pękanie [1]. Urządzenia, które pracują w szczególnie intensywnym korozyjnym środowisku, jak pompy szlamowe, wymagają materiałów odpornych na synergiczne działanie ściernokorozyjne [2]. Dla właściwej selekcji materiałów na elementy maszyn górniczych potrzebna jest wszechstronna analiza ich warunków pracy [1-6]. Selekcja powinna obejmować szeroki wachlarz stopów metali, materiałów ceramicznych, polimerów i kompozytów (rys. 2).



Rys. 1. Trzy rodzaje oddziaływań ściernych: a) udarowe i niskonaprężeniowe, b) wysokonaprężeniowe  
Fig. 1. Three types of abrasive action: a) impact and low stress sliding, b) high stress



Rys. 2. Względne usytuowanie różnych materiałów odpornych na zużycie w warunkach łącznego oddziaływania ściernego, udarowego i korozyjnego

Fig. 2. Relative placement of various wear-resistant alloy systems when considering abrasion, impact and corrosion

## 2. Materiały dla górnictwa i przeróbki minerałów

Obserwując przyrodę ożywioną można rozpoznać bardzo zróżnicowaną, w wyniku ewolucji, materię, z której się ona składa. Twardość i mikrostruktura zębów, kłów i szponów pozwala np. na cięcie i zgniatanie, podczas gdy miękkie i elastyczne stopy i łapy, adaptując się do nierówności i granulacji podłoża, minimalizują zużywanie lub uszkodzenia w miejscach styku z nierównościami. Można zrobić uogólnienie, że przyroda ożywiona stosuje materiały miększe i bardziej podatne na odkształcenie, podczas gdy w technice stosujemy raczej materiały twardsze i sztywniejsze, co jest rezultatem zaakceptowanych wymogów tolerancji wymiarów i prasowania. Jednym z rezultatów powyższych spostrzeżeń jest nowe podejście do problemu doboru materiałów w technice, w szczególności podejmowane są próby stosowania elastomerów, nawet w tribosystemach charakterystycznych dla górnictwa i przeróbki minerałów.

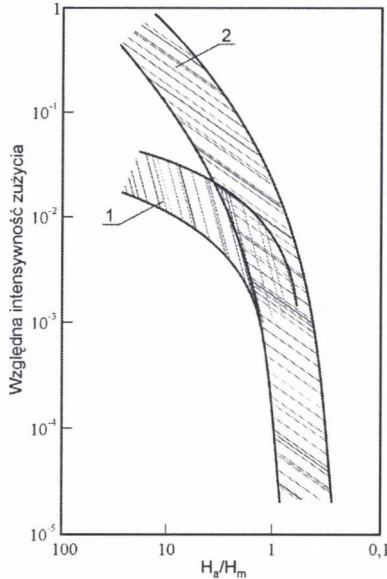
Tak jak materiały organiczne w przyrodzie, tak elastomery w technice mają ściśle określony dopuszczalny przedział zmian temperatury, w którym mogą być z powodzeniem stosowane na węzły tarcia. Ten przedział zaczyna się od temperatury zeszklenia,  $T_g$  ( $-60^{\circ}\text{C}$  dla kauczuku silikonowego,  $-50^{\circ}\text{C}$  dla kauczuku naturalnego,  $-50^{\circ}\text{C}$  do  $25^{\circ}\text{C}$  dla poliuretanów) do temperatury niższej około  $10^{\circ}\text{C}$  od temperatury rozkładu lub topienia ( $\sim 80^{\circ}\text{C}$  do  $130^{\circ}\text{C}$ ), zgodnie z tabelą 1.

Tabela 1

Zakresy temperatury pracy dla elastomerów [4]

Elastomer	Temperatura pracy	Temperatura zeszklenia, $T_g$
	°C	
Poliuretan (PUR)	do 75	-50 do 25
Polisiloksanen	-100 do 300	-50
Polibutadien (BR)	do 80	-70 do -50
Kauczuk naturalny	-50 do 105	-52
Kauczuk butadienowo-nitrylowy (NBR)	-50 do 120	-55 do -20
Chloropren	-45 do 120	-45
Etylen propylenowo-dienowy (EPDM)	-50 do 125	-50 do -40
Poliizopren (IR)	do 110	-60
Kauczuk butadienowo-styrenowy (SBR)	do 110	-60 do -50
Fluoropochodne węglowodory	-30 do 205	zmienny
Kauczuk butylowy (IIR)	-50 do 115	-63

Tak jak dla elastomerów temperatura zeszklenia ( $T_g$ ) i temperatura topienia wyznaczają wyraźną granicę ich stosowania, to dla metali, materiałów ceramicznych i ich kompozytów granicę tę wyznacza stosunek twardości ścierniwa (lub cząstek erodujących) do twardości analizowanego materiału (rys. 3).



Rys. 3. Względna intensywność zużycia ściernego w funkcji stosunku twardości ścierniwa do twardości materiału ( $H_a/H_m$ ) dla metali i stopów (1) i materiałów ceramicznych (2)

Fig. 3. Relative wear rate plotted against the ratio of the hardness of the abrasive to that of the material ( $H_a/H_m$ ) for a range of metallic (1) and ceramic materials (2)

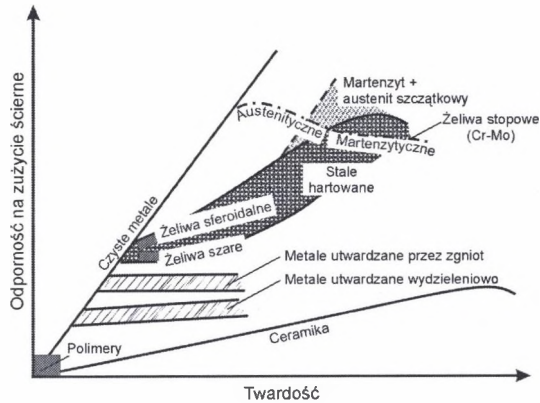
Upraszczając tę zależność (wpływ  $\frac{H_a}{H_m}$  na intensywność zużycia został opisany

dokładnie w [7]), można w przybliżeniu określić granicę stosowania tej grupy materiałów nierównościami:  $\frac{H_a}{H_m} < 1$ . Intensywność zużywania materiału rośnie po wyczerpaniu się jego

zdolności do utwardzania w wyniku oddziaływań tribologicznych. Następuje to po osiągnięciu poziomu odkształceń, które wywołują raczej pęknięcie niż płynięcie materiału. Stale i żeliwa o większej zdolności do utwardzania dłużej wytrzymują oddziaływania tribologiczne, bez objawów inicjacji pęknięć. Przez odpowiedni dobór składu chemicznego i struktury wieloskładnikowych materiałów metalowych można zwiększyć ich zdolność do utwardzania w wyniku oddziaływań ścierno-erozyjnych (rys. 4), a przez to zwiększyć ich odporność na zużycie ściernie.

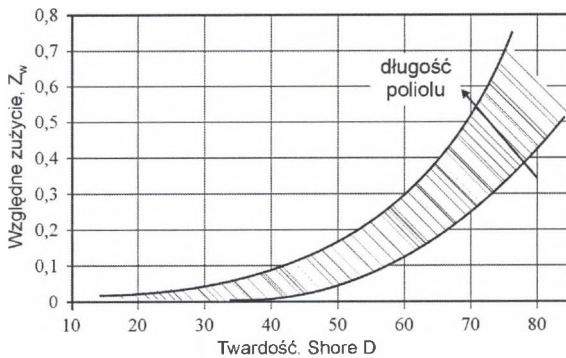
Morfologię elastomerów poliuretanowych można porównać do mikrostrukturalnego układu złożonego z powtarzających się na przemian miękkich i twardych segmentów łańcuchów polimerowych. Większość poliuretanów składa się z trzech bazowych reagentów: polioliu, stanowiącego główną część segmentu miękkiego, dwuizocyjanianu oraz przedłużenia łańcucha z segmentu twardego. W materiałach tych występuje rozdział faz w wyniku

ograniczonej zdolności do mieszania się twardych i miękkich segmentów. Miękkie domena decydują o głównych właściwościach elastomeru, podczas gdy twarde domena, podobnie jak utwardzanie dyspersyjne w metalach, zwiększają sztywność i wytrzymałość mechaniczną elastomeru.



Rys. 4. Odporność na zużycie ściernie dla różnych materiałów w funkcji ich twardości, otrzymana w badaniach w obecności ziaren węgla krzemu

Fig. 4. Abrasion resistance of various materials plotted against bulk hardness tested with silicon carbide



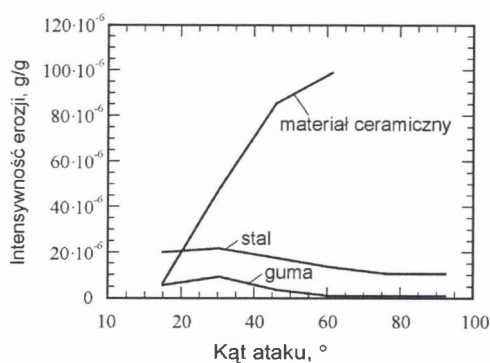
Rys. 5. Zmiana zużycia względnego polieteruretanów w funkcji ich twardości.  $Z_w$  jest względnym zużyciem wyliczonym w stosunku do zużycia standardowej stali niskowęglowej [4]

Fig. 5. Variation in relative wear for polyetherurethanes as a function of Shore D hardness.  $Z_w$  is given as a percentage of the wear of mild steel standard [4]

W przeciwieństwie do większości metali i ich stopów (rys. 4), niektóre elastomery wykazują tendencję do obniżenia odporności na zużycie wraz ze wzrostem twardości, co przykładowo ilustruje rys. 5. Potwierdza to, że nie zawsze reguła „twardsze jest lepsze” obowiązuje w praktyce. Konstruktor do projektowania np. instalacji transportowych dla górnictwa powinien mieć pełną informację o występujących w tej instalacji tribosystemach i o warunkach ich pracy.



W celu osiągnięcia optymalnego ekonomicznie i technologicznie efektu, wynikającego z wprowadzenia nowych materiałów, zaleca się nie tylko prostą zamianę jednego materiału na drugi. Powinno się przy tym wykorzystać wiedzę na temat tribologicznych cech tych materiałów. Dla przykładu, próby zastąpienia elementów stalowych elastomerami w przesiewaczach bębnowych i sortownikach, lub propozycje zastosowania okładzin ceramicznych w rurociągach transportowych bez żadnych innych, uzupełniających zmian konstrukcyjnych w tych instalacjach nie pozwoliłyby na optymalne wykorzystanie własności użytkowych nowych materiałów (rys. 6).



Rys. 6. Zmiana intensywności zużycia w funkcji kąta ataku w teście zużywania erozyjnego różnych materiałów [4]

Fig. 6. Variation in wear rate as a function of angle of incidence for erosion jet conditions in variety of materials [4]

Wyniki badań wyraźnie wskazują, że zastąpienie stali gumą zmniejsza zużycie, ale jeszcze większe efekty można uzyskać zwiększając dodatkowo średni kąt ataku np. z 30° do 60°. Można to uzyskać przez wprowadzenie geometrycznych zmian konstrukcyjnych np. w przesiewaczach lub sortownikach. Wprowadzenie okładzin ceramicznych wymaga ścisłej kontroli przepływu medium w rurociągu, tak aby kąt ataku na ścianki nie był większy od 20°. Ten prosty przykład poparty danymi eksperymentalnymi (rys. 6) pokazuje, że przez zmiany konstrukcyjne urządzeń górniczych i przeróbczych można osiągnąć większą redukcję zużycia niż poprzez zastosowanie drogich, odpornych na zużycie materiałów. Główne grupy materiałów już stosowanych w górnictwie i przeróbce minerałów lub aktualnie proponowane do nowych zastosowań przedstawia tabela 2.

Elementy maszyn górniczych i przeróbczych pracujące w warunkach bardzo wysokich naprężeń stykowych, jak to ma miejsce w czasie urabiania, kruszenia i mielenia, są i będą wykonywane z materiałów, które łączą w sobie dwie cechy: wysoką twardość i wysoką odporność na kruche pękanie [6].

Tabela 2

Charakterystyka materiałów stosowanych w górnictwie i przeróbce minerałów [1-12]

Rodzaj materiału	Nazwy materiałów	Zastosowanie	Zalety	Wady
Ceramiczne	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> SiC Kompozyty ceramiczne	Ochronne okładziny na: zsuwnie, leje wyladownicze, zbiorniki retencyjne, przenośniki, oddzielacze odśrodkowe, rury, załadownice	Wysoka twardość, wysoka odporność na zużycie ściernie nisko i średnio obciążonych węzłów tarcia. Wysoka odporność na zużycie erozyjne dla niskich kątów ataku. Wysoka odporność na środowisko korozyjne	Niska lub bardzo niska odporność na kruche pękanie. Niska odporność na oddziaływania udarowe
Cermetale	WC-Co WC-TiC-Co TiCN-Ni-Mo Kompozyty WC-Co podwójnie spiekane. Kompozyty WC-Co z funkcjonalną gradacją własności	Narzędzia górnicze, noże kombajnowe, krawędzie czerpaków, wiertła	Wysoka twardość. Wysoka odporność na zużycie ściernie, w tym wysokonaprzeżeniowe. Wysoka odporność na korozję dla specjalnych mikrostruktur	Średnia odporność na kruche pękanie szczególnie dla struktur o niskiej zawartości osnowy metalowej
Żeliwa stopowe	Wysokochromowe	Wykładziny młynów i kruszarek. Elementy zsuwni i zbiorników	Wysoka odporność na zużycie ściernie i erozyjne. Wysoka odporność na korozję i synergię ściernio-korozyjną	Średnia odporność na udar
	Chromowo-molibdenowe	Elementy pomp szlamowych i młynów pracujących na mokro, wypusty pracujące udarowo	Odporne na korozję i ścieranie	Niska odporność na kruche pękanie, zła spawalność
	Napawane metodami spawalniczymi	Zęby uchwytów, ładowarek i koparek, płyty i okładziny ochronne w młynach, kruszarkach i przenośnikach zgrzeblowych. Pompy szlamowe	Dobra odporność na zużycie ściernie	Duży nakład pracy i ograniczona twardość
Stale	Austenityczne manganowe	Sworznie, czopy, tuleje	Wysoka odporność na kruche pękanie. Dobra hartowność	Słaba odporność na zużycie ściernie. Wzrost kruchości w podwyższonych temperaturach
	Martensytyczne	Bębny, elementy łańcuchów	Dobra odporność na udar i ścieranie, dobra spawalność	Niska twardość
	Perlityczne	Wykładziny	Dobra odporność na udar	Słaba odporność na synergiczne oddziaływania korozyjno-ściernie
Poliuretany	Poliester Polieter	Cyklon, sita Cyklon, sita	Dobra odporność na zużycie ściernie i erozyjne	Temperatura pracy <70°C. Słaba odporność na udar

cd. tabeli 2

Kauczuk naturalny		Opony, taśmy, przewody giętkie	Dobra odporność na udar i ścieranie	Słaba odporność na środowisko węglowodorów
Kauczuki syntetyczne	Kauczuk nitylowy	Uszczelnienia olejowe, przewody hydrauliczne giętkie	Dobra odporność na środowisko węglowodorów, dobra odporność na ścieranie	Słaba odporność na działanie ketonu i ozonu
	Kauczuk neoprenowy	Uszczelnienia olejowe, przewody hydrauliczne giętkie	Dobra odporność na środowisko węglowodorów, dobra odporność na ścieranie	Słaba odporność na działanie rozpuszczalników i kwasów
	Kauczuk silikonowy	Uszczelki, kable	Elastyczność w niskich temperaturach	Słaba odporność na działanie benzyny i niska odporność na ścieranie
	Kauczuk fluoro-węglowodorowy	Uszczelki, kable	Odporność chemiczna, szeroki zakres temperatury pracy	Słaba odporność na działanie ketonu

Obszerne badania eksploatacyjne żeliw stopowych napawanych na zęby koparek [3] wykazały zdecydowaną przewagę żeliw o dużym procentowym udziale twardych węglików w strukturze stopu (tabela 3).

Tabela 3  
Materiały żeliwne wyselekcjonowane do badań eksploatacyjnych [3]

Oznaczenie	Skład, %	Średni czas pracy w odniesieniu do Z5, %	Średnia twardość (HRC)
Z1	5,3C-11Cr-6,5Nb-6V	142	64,7
Z2	4,8C-4,9B-2Ni-1,5Mn-0,85i	126	65,6
Z3	5,7C-20,2Cr-6,1Nb-6,8Mo-1,8W	115	62,7
Z4	5,6C-20,5Cr-6,5Nb-1Si-1Mn	101	62,7
Z5	5,2C-22Cr-7Nb	100	62,1
Z6	2,2C-7,5Cr-1Mo-0,9B-0,9V	98	66,1

Żeliwo Z6 o niskiej zawartości węgla ma najniższą odporność na zużycie ściernie z tej grupy żeliw. Natomiast stopy na bazie Cr-N6-V(Z1) oraz na bazie (B-Ni-Mn) demonstrowały najwyższą odporność na zużycie ściernie.

Na potrzeby górnictwa, w szczególności dla wiertel i noży kombajnowych, rozwijana jest nowa generacja węglików spiekanych WC-Co, tzw. podwójnie spiekanych (DC). Charakteryzują się one wyższą odpornością na kruche pękanie niż węgliki konwencjonalne, przy porównywalnej lub wyższej twardości i odporności na zużycie [8,9]. Coraz szerzej stosowane są także materiały ceramiczne jako wykładziny wewnętrzne rur, cyklonów oraz pomp [10, 11, 12].



### 3. Podsumowanie

Istotnym osiągnięciem ostatnich lat w technice badań materiałów na potrzeby górnictwa było opracowanie metod łącznego (synergicznego) badania oddziaływań: ściemnego, korozyjnego i termicznego, symulujących eksploatacyjne warunki pracy urządzeń górniczych [2]. Dobre właściwości użytkowe elastomerów, wykazywane w zastosowaniach górniczych, można wytłumaczyć w oparciu o wiedzę o ich specyficznej mikrostrukturze. W przypadku elastomerów poliuretanowych dwufazowość ich budowy składająca się z twardego dwuizocyjanianu, czyli segmentu, który działa jak wiązanie poprzeczne w miękkiej i elastycznej osnowie z polietenu lub poliestru, zapewnia im dobre własności użytkowe, w tym wysoką odporność na zużycie.

Opracowanie i wyprodukowanie materiałów o optymalnej odporności na zużycie musi uwzględniać całość tribosystemu, łącznie z jego wewnętrznymi relacjami oraz uwarunkowaniami zewnętrznymi o charakterze mechanicznym, chemicznym i termicznym z otoczeniem systemu. Osiągnięcie rozwiązania optymalnego wymaga znajomości mechanizmu zużywania i niszczenia w relacji do cech elementów systemu, takich jak skład chemiczny i mikrostruktura.

#### LITERATURA

1. Wray J., Daykin K.: The design of coal preparation plant to combat wear. I. Mech. E. Publication, C332, 1984, 227-234.
2. Ścieszka S.F.: Synergizm w procesach tribologicznych. Tribologia, 3, 2002, s. 1031-1038.
3. Fernandez J., Martin A.: Materials selection to excavator teeth in mining industry. Wear, 250, 2001, 11-18.
4. Sare I., Mardel J., Hill A.: Wear – resistant metallic and elastomeric materials in the mining and mineral processing industries – an overview. Wear, 250, 2001, s. 1-10.
5. Moreton G., Yardley E.: Tribological problems in the coal mining industry – some case histories. Wear, 64, 1980, 101-113.
6. Ścieszka S.F., Filipowicz K.: Materiały na narzędzia górnicze – nowe trendy w technice badań. Gliwice 2001.
7. Hutchings I., Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials. E. Arnold. London 1992.
8. Fang Z., Lockwood G.: Properties of a high toughness cemented tungsten carbide composite, MPiF, New Jersey 1999, 10-123.
9. <http://www.eng.uab.edu/nsf/index>.
10. <http://www.ferro.com/our+products>.
11. <http://wear-resistant.com/mining>.
12. <http://www.kennametal.com/en/mining>.

**Abstract**

Wear resistance can be increased on mining and mineral processing equipment through proper material selection and equipment design, and through the use of wear plates, as well as hardfacing deposition. The method selected will depend on the type and use of the part and the economics associated with operation of the equipment. A variety of materials that provide wear resistance are shown in the paper. High impact resistance can be achieved with high – manganese ferrous alloys. A Hadfield alloy is a traditional material for impact resistance. The alloy work hardens with impact and deformation, resulting in increased strength and hardness. A part that experiences wear should be designed for easy replacement to prevent excessive processing downtime. The paper lists a broad range of high – carbon steels, alloyed white irons and non – traditional materials such as alumina ceramics, polyurethanes and rubbers.

Such demands by the mining and quarrying industries as – low frictional resistance, and a high resistance to sliding abrasion, impact, erosion and corrosion will not be satisfy by single material. But it is possible to provide a concise range of materials that enable the designer to select the correct material to suit the conditions with regard to reliability and overall cost effectiveness when compared with traditional materials.