Wojciech GRZEGORZEK*

WYZNACZANIE CHARAKTERYSTYK MECHANICZNYCH WĘGLIKÓW SPIEKANYCH ZA POMOCĄ TRIBOLOGICZNEJ METODY ŁĄCZNEGO BADANIA ODPORNOŚCI NA ZUŻYCIE ŚCIERNE I PĘKANIE KRAWĘDZIOWE

HARDMETAL MECHANICAL CHARACTERIZATION BY USING THE TRIBOTESTING METHOD OF SIMULTANEOUS ABRASION AND EDGE FRACTURE RESISTANCE ESTIMATION

Słowa kluczowe:

badania tribologiczne, zużycie ścierne, odporność na pękanie, węgliki spiekane

Key words:

tribotesting, abrasion, fracture toughness, hardmetals

Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki badań odporności na zużycie ścierne i pękanie wybranych gatunków węglików spiekanych. Znajomość charakterystyk mecha-

* Politechnika Śląska, Wydział Górnictwa i Geologii, Zakład Maszyn Górniczych, Budowlanych i Drogowych, ul. Akademicka 2A, 44-100 Gliwice, Polska, e-mail: wojciech.grzegorzek@polsl.pl.

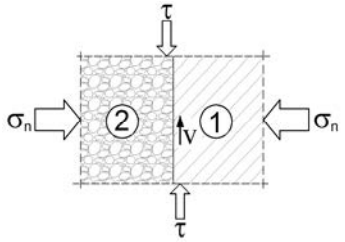
nicznych węglików spiekanych pozwala na ich klasyfikację pod względem własności funkcjonalnych. Celem pracy była analiza możliwości badawczych tribologicznej metody łącznego wyznaczania odporności na zużycie ścierne i pękanie krawędziowe. Ma ona być alternatywą dla funkcjonujących obecnie metod wyznaczania krytycznego współczynnika intensywności naprężeń K_{IC}.

WPROWADZENIE

Odporność na zużycie ścierne i pękanie są głównymi parametrami charakteryzującymi materiały stosowane na ostrza narzędzi skrawających, takich jak np. wiertła, noże kombajnów ścianowych i chodnikowych. Obecnie ostrza tych narzędzi wykonuje się głównie z węglików spiekanych (WC-Co), a w niektórych specjalnych zastosowaniach wykonywane są także powłoki (np. z węglika tytanu lub CLD – *Carbon Like Diamond*). Znaczenie ww. parametrów jest konsekwencją udziału dwóch głównych mechanizmów uszkodzeń prowadzących do utraty zdatności eksploatacyjnej ostrzy narzędzi, czyli ich zużycia ściernego i pękania w kontakcie ze skałą w trakcie wiercenia lub urabiania przez skrawanie. Odporność na kruche pękanie jest też często głównym parametrem ograniczającym stosowanie twardych materiałów narzędziowych. Stąd istnieje potrzeba badań mających na celu zwiększenie odporności na kruche pękanie bez konieczności poświęcania odporności na zużycie ścierne. Z kolei szybki rozwój przemysłu i coraz wyższe wymagania dotyczące jakości produktów pociągają za sobą konieczność ciągłego doskonalenia materiałów narzędziowych. W poszukiwaniu nowych rozwiązań materiałowych czy też technologicznych, związanych z poprawą własności mechanicznych ostrzy narzędzi skrawających, niezbędna jest prosta i niezawodna metoda badań. Przedstawione w pracy **[L. 11]** obszerne studium literatury z zakresu konwencjonalnych i niekonwencjonalnych metod wyznaczania odporności na kruche pękanie potwierdza trudności w badaniu węglików spiekanych. Stosowanie obecnie akceptowanych metod wyznaczania krytycznego współczynnika intensywności naprężeń K_{IC} dla tej grupy materiałów narzędziowych jest wciąż znacznie ograniczone (brak normy międzynarodowej ISO). Stąd w pracy przedstawiono rezultaty wykorzystania prostej zintegrowanej metody badań **[L. 14, 15]**, w której występuje zarówno zużycie ścierne, jak i pękanie wraz z rozdrabnianiem ścierniwa. Zastosowane w niej systemowe podejście do badań tribologicznych umożliwia wyznaczenie charakterystyk mechanicznych węglików spiekanych w kontakcie ściernym z minerałem, a opracowana procedura badań może być alternatywą dla obecnie stosowanych metod badawczych. Dodatkowo, opracowana metoda badań jest bardziej uniwersalna niż metoda standardowa **[L. 1]**, gdyż pozwala dość ściśle symulować warunki ścierania wewnątrz różnych systemów przeróbki minerałów, jak również podczas procesów wiercenia, skrawania i drążenia tunelów.

Jest oczywiste, że odporność na zużycie ścierne nie jest cechą wewnętrzną materiałów, a własnością całego systemu, w którym materiał ten jest tylko jednym z elementów. Pokazane na **Rys. 1** zużycie ścierne spowodowane jest przez twarde cząstki, poddane wymuszonemu ślizganiu i toczeniu po powierzchni materiału **[L. 6]**. Intensywność zużycia ściernego jest tu znacząco zależna od wskaźnika rozdrobnienia (IC) cząstek ścierniwa **[L. 8, 17]**. Zależność ta jest przypisana rozpadowi ziaren i towarzyszącemu mu gwałtownemu uwalnianiu energii odkształcenia sprężystego oraz tworzeniu nowych, ostrych krawędzi będących źródłem wzrostu intensywności ścierania. Powyższe oznacza, że rozdrobnienie cząstek ściernych jest parametrem, który należy uwzględniać przy opisie systemów tribologicznych, w których dominuje układ jak na **Rys. 1**. Tego rodzaju zużycie ścierne często występuje w działalności przemysłowej, np. w górnictwie (wiercenie, urabianie, załadunek i transport) czy też przeróbce minerałów.

Zużycie ścierne jest zwykle spowodowane przez twarde cząstki minerałów, które wywołują nieznaczną adhezję, powodując brak zatarcia. Duża różnorodność kształtów i własności mechanicznych ścierniw oraz warunków obciążeń prowadzi do dużej zmienności naprężeń podczas kontaktu tribologicznego.



Rys. 1. Ścieranie cząstek twardych (skala laboratoryjna) lub zgranulowany minerał ścierny (skala przemysłowa), gdzie: 1 – materiał (próbka), 2 – cząstki ścierniwa (przeciwpróbka)

Fig. 1. Hard particles abrasion (laboratory scale process) or granular bulk solid abrasion (industrial scale process), where: 1 – material (first body), 2 – abradant particles (second body)

Produkty zużycia powstają w wyniku pojedynczego lub wielokrotnego działania ścierniwa, tj. mikrobruzdowania, mikroskrawania, mikropękania i mikrozmęczenia. Ta różnorodność procesów zużycia oraz ich warunków skutkuje różnymi kombinacjami procesów elementarnych, obejmujących niszczenie i odspajanie warstw powierzchniowych. Ponieważ zużycie ścierne jest procesem złożonym i zmiennym, to dobór materiału dla systemu tribologicznego można określić tylko poprzez starannie zaprojektowaną symulację **[L. 13]**, w której elementy mechaniczne podlegają procesom podobnym do warunków rzeczywistych. Jeśli np. warunki rzeczywiste obejmują takie procesy jak: zużycie ścierne materiału i kruszenie cząstek ścierniwa, to oba te mechanizmy muszą zostać uwzględnione w symulacji.

STANOWISKO LABORATORYJNE I METODA BADAŃ

Badania przeprowadzono na opracowanym w Instytucie Mechanizacji Górnictwa Politechniki Śląskiej w Gliwicach, a wykonanym w Instytucie Technologii Eksploatacji – Państwowym Instytucie Badawczym w Radomiu stanowisku laboratoryjnym. Na **Rys. 2** przedstawiono ogólny widok stanowiska z zamontowanym testowym węzłem tarcia i sposobem jego obciążenia. Charakterystykę stanowiska zamieszczono w **Tabeli 1**.

Rys. 2. Ogólny widok stanowiska badawczego zbudowanego przez Instytut Technologii Eksploatacji – Państwowy Instytut Badawczy w Radomiu z zamontowanym testowym węzłem tarcia (3), krążkiem obciążnika (2), czujnikami siły i momentu (4) oraz napędem (1)

Fig. 2. The overall view of the complete apparatus built by the Institute for Sustainable Technology – National Research Institute in Radom with mounted test friction node (3), loading pulley (2), normal load and torque indicators (4) and device drive (1)

Stanowisko badawcze **(Rys. 2)** posiada zespół napędowy 1 realizujący ruch obrotowy wałka **(Rys. 3)** wokół pionowej osi oraz zespół obciążenia z obciążnikami 2 wywierający wewnątrz testowego węzła tarcia 3 docisk ziaren ścierniwa do próbki badanego węglika spiekanego. Testowy węzeł tarcia składa

się z cylindra będącego pojemnikiem dla zgranulowanego ścierniwa mineralnego oraz obracającego się w nim wałka z tarczą oporową **(Rys. 3)**, która jest uchwytem dla próbki badanego węglika spiekanego. Zastosowano dwa specyficzne kształty próbek: o przekroju trójkątnym **(Rys. 3a)** do wyznaczania odporności na kruche pękanie materiałów twardych (krytyczna wartość współczynnika intensywności naprężeń) oraz o przekroju kwadratowym **(Rys. 3b)** do wyznaczania odporności na zużycie ścierne materiałów konstrukcyjnych w kontakcie ze ścierniwem mineralnym. Konstrukcja stanowiska zapewnia skok pionowy cylindra wynoszący około 100 mm, a zespół napędowy stanowiska zapewnia stałą, niezależnie od obciążenia, prędkość obrotową wałka wynoszącą do 100±1 obr./min. Stanowisko badawcze posiada urządzenie pozwalające wyłączyć silnik napędowy po wykonaniu przez wałek zadanej liczby obrotów oraz system sterująco-pomiarowy umożliwiający ciągły pomiar i rejestrację na dysku komputera: siły obciążającej, oporów ruchu, przemieszczenia liniowego, temperatury wewnątrz cylindra oraz prędkości obrotowej wałka z próbką.

Badanie polegało na kontrolowanym łącznym działaniu twardego minerału sypkiego zarówno jako ścierniwo, jak i wielopunktowe źródło obciążające próbkę badanych węglików spiekanych w pobliżu ich krawędzi. Charakterystykę użytych do badań ścierniw przedstawiono w **Tabeli 2**. Wyniki badań wykorzystano do klasyfikacji wybranych gatunków węglików spiekanych pod względem ich odporności na pękanie oraz odporności na zużycie ścierne. Łączne działanie ziarnistego ścierniwa odbywało się w cylindrycznej komorze, gdzie naprężenie normalne σ_n było kontrolowane przez obciążenie zewnętrzne F_n. Moment obrotowy T na wale napędowym służył do pokonania oporu ścinania ścierniwa i oporu tarcia na styku krawędzi próbki i ścierniwa. Metoda badań, która umożliwia jednoczesne badanie kruchego pękania i ścierania pozwala na symulację warunków naprężenia i prędkości przemieszczenia pomiędzy wiertłem a skałą. Kolejną zaletą testowego węzła tarcia jest to, że zmielone ścierniwo może opuścić obszar ścierania przez szczelinę pomiędzy uchwytem próbki a ścianką komory cylindrycznej, jak to ma miejsce w rzeczywistych warunkach wiercenia lub rozdrabniania.

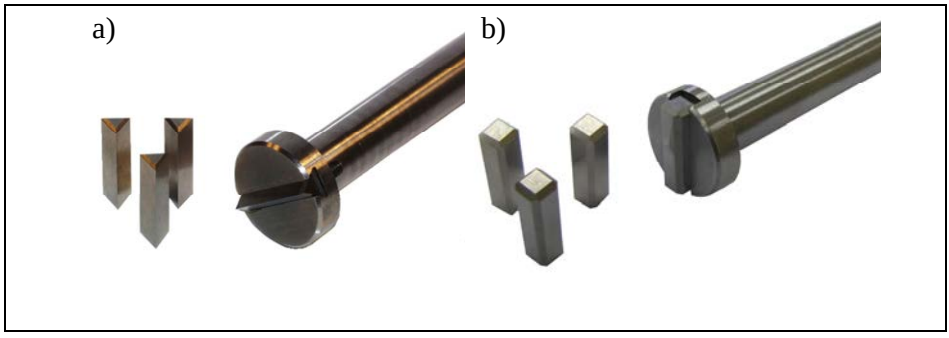
Tabela 1. Ogólna charakterystyka stanowiska laboratoryjnego
Table 1. Specification of the apparatus and experimental details

Parametr	**Wartość**
Obciążenie normalne F_n, N	1000
Naprężenie normalne σ_n, MPa	2,4
Prędkość obrotowa wału n, min^{-1}	30
Czas trwania testu t, obr.	15
Średnia droga przesuwu s, m	0,471
Ścierniwo A	Elektrokorund (600–1200 μm) Al_2O_3
Ścierniwo B	Piasek kwarcowy (600–1200 μm) SiO_2

Tabela 2. Podstawowe własności mechaniczne wybranych materiałów (ścierniw) badanych w kontakcie z próbkami z węglików spiekanych BWC2 (Tabela 3)
Table 2. Basic mechanical properties of selected minerals (abradant) tested vs. BWC2 hardmetal bars **(Table 3)**

Własności	**99% SiO_2**	**99% Al_2O_3**
Twardość Vickersa (HV)	~970	~1500
Wytrzymałość na ścinanie $\tau=\tau_r$ (MPa)	2,58	2,99
Kohezja pozorna C (MPa)	~0	~0
Kąt tarcia wewnętrznego ϕ (deg)	53,1	55,8
Kruszalność IC (mg/J)	2,030	1,792
Wskaźnik ścieralności AF (mg/kg)	140	437
Ścieralność IA (mg/m^{2}s)	**111**	**403**

Próbki do badań **(Rys. 3)** wykonano zgodnie ze specyfikacją projektu **[L. 10]**, który obejmował: odchyłkę kąta wierzchołka krawędzi (60˚ ±0,3˚) oraz chropowatość powierzchni od strony badanych krawędzi (średnia arytmetyczna odchyłka profilu Ra ≤ 0,2 μm) uzyskaną poprzez szlifowanie. Badane krawędzie nie były fazowane, natomiast zwrócono szczególną uwagę na ich ostrość, która była losowo kontrolowana za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego. Producenci dostarczyli próbki wybranych gatunków węglików spiekanych wraz z ich składem i charakterystyką mechaniczną, która obejmowała: gęstość ρ zmierzoną zgodnie z normą ISO 3369; moduł sprężystości (moduł Younga) E, zmierzony zgodnie z normą EN 23312; twardość Vickersa HV_{30}, zmierzoną zgodnie z normą ISO 3878; odporność na kruche pękanie K_{IC} zmierzoną za pomocą testu Palmqvista. Własności wybranych do badan węglików spiekanych zestawiono w **Tabeli 3**.



Rys. 3. Uchwyt próbek z wałkiem i próbki: a) o przekroju trójkątnym, b) prostopadłościenna
Fig. 3. Specimen holder, drive shaft and specimens: a) triangular and b) rectangular

Tabela 3. Skład węglików spiekanych badanych z udziałem elektrokorundu (węgliki AWC) oraz piasku kwarcowego (węgliki BWC) jako ścierniwa i ich charakterystyka mechaniczna (dane producenta, wewnątrzlaboratoryjne oznaczenie gatunku węglika spiekanego)

Table 3. Hardmetal composition tested with alumina (AWC hardmetal) and quartz sand (BWC hardmetal) abradant and their mechanical specification (manufacturer's data, laboratory internal hardmetal's grade denotation)

Oznaczenie próbki węglików spiekanych	Skład, %			ρ Mgm^{-3}	E GPa	K_C $MPam^{1/2}$	Twardość HV_{30}
	WC	TiC+TaC+NbC+VC	Co, Ni				
AWC1	90	–	10	14,52	590	10,02	1543
AWC2	90	1	9	14,37	580	9,52	1589
AWC3	90	2	8	14,55	590	10,08	1679
AWC4	96,7	–	3,3	15,32	620	8,20	2071
AWC5	80	–	20	13,53	480	35,70	890
AWC6	75	–	25	13,11	440	42,70	804
BWC1	91	–	9	14,60	590	17	1250
BWC2	94	–	6	14,90	630	14	1430
BWC3	85	–	15	14,00	540	18	1150
BWC4	94	–	6	14,90	640	11	1600
BWC5	94	–	6	14,85	630	10	1800
BWC6	87	5	8	13,40	520	13	1500

Szczegółowy opis przebiegu procedury badań zaprezentowano w **[L. 11]**. Zachowanie odpowiedniej kolejności realizacji zawartych w niej czynności jest warunkiem poprawności i powtarzalności uzyskiwanych wyników.

Wykorzystana do badań węglików spiekanych metoda oparta jest na koncepcji dokładnego rozróżnienia pomiędzy początkowymi, tribologicznymi procesami przejściowymi, w których dominuje kruche pękanie krawędzi oraz stabilnym etapem zużywania powodowanym głównie przez mechanizm mikroskierania. Stabilny etap zużywania pozwala na klasyfikację węglików spiekanych z punktu widzenia odporności na ścieranie.

Wstępne wyniki badań wykazały, że proces wykruszania krawędzi (zużycie przejściowe kontrolowane głównie przez wykruszanie krawędzi próbki) miało miejsce tylko podczas pierwszych 15 obrotów. Stąd zdecydowano, że procedura badań będzie składać się z trzech lub pięciu kolejnych prób trwających 15 obrotów, lecz tylko pierwsza próba zaczynała się z ostrą (nową) krawędzią próbki. Procedura badań powtarzana była co najmniej trzy razy dla każdej próbki (krawędzi) badanego materiału. W każdej próbie stosowano tylko jedną wartość siły normalnej wynoszącą 1000 N. W tej części badań, na podstawie wyników zrealizowanych pomiarów, wykonano obliczenia następujących wielkości, których wyniki zestawiono w **Tabelach 4–7**:

Średnie zużycie masowe w trakcie pierwszych prób powtórzonych każdorazowo z użyciem nowych, ostrych krawędzi próbek

$$\overline{\Delta m_1} = \frac{1}{n}\sum_{1}^{n}\Delta m_1 \text{ , mg} \tag{1}$$

gdzie: n – liczba testowanych krawędzi, Δm_1 – **zużycie masowe w trakcie pierwszej próby** (pierwsza z trzech lub pięciu kolejnych prób zaczynająca się z użyciem nowej, ostrej krawędzi) trwająca 15 obrotów.

Średnie zużycie masowe w trakcie innych prób niż pierwsze (próby 2–5), każda trwająca 15 obrotów, oznacza utratę masy w wyniku dominującego zużywania ściernego, po zakończeniu zużywania przez wykruszanie ostrza (krawędzi) próbki

$$\overline{\Delta m^a} = \frac{1}{k \cdot n}\sum_{1}^{k\cdot n}\Delta m^a \text{ , mg} \tag{2}$$

gdzie: k = p – 1, p – liczba prób, n – liczba testowanych krawędzi, Δm^a – **zużycie masowe w trakcie innych prób niż pierwsze** (próby 2–5), każda trwająca 15 obrotów.

Średnie zużycie masowe wyłącznie w wyniku wykruszeń krawędzi (podczas pierwszych prób)

$$\overline{\Delta m^F} = \overline{\Delta m_1} - \overline{\Delta m^a} \text{ , mg} \tag{3}$$

Średnie zużycie objętościowe w trakcie pierwszych prób powtórzonych każdorazowo z użyciem nowych, ostrych krawędzi próbek

$$\overline{\Delta V_1} = \frac{\overline{\Delta m_1}}{\rho} \text{ , mm}^3 \tag{4}$$

gdzie ρ – gęstość, mg/mm^3.

Średnie zużycie objętościowe w trakcie innych prób niż pierwsze (próby 2–5) każda trwająca 15 obrotów

$$\overline{\Delta V_a} = \frac{\overline{\Delta m^a}}{\rho} \text{ , mm}^3 \tag{5}$$

Średnie zużycie objętościowe wyłącznie w wyniku wykruszeń krawędzi (podczas pierwszych prób)

$$\overline{\Delta V_F} = \frac{\overline{\Delta m^F}}{\rho} \text{ , mm}^3 \tag{6}$$

Masowy wskaźnik odporności na ścieranie

$$AR = \frac{15}{\Delta\overline{m}^{a}}, \text{ obr/mg} \tag{7}$$

Objętościowy wskaźnik odporności na ścieranie

$$AR_V = \frac{15}{\Delta\overline{V}_a}, \text{ obr/mm}^3 \tag{8}$$

Masowy wskaźnik odporności na pękanie

$$FR = \frac{15}{\Delta\overline{m}^{F}}, \text{ obr/mg} \tag{9}$$

Objętościowy wskaźnik odporności na pękanie

$$FR_V = \frac{15}{\Delta\overline{V}_F}, \text{ obr/mm}^3 \tag{10}$$

Bezwymiarowy wskaźnik wykruszeń

$$FI = \frac{\Delta\overline{m}^{F}}{\Delta\overline{m}_1} = \frac{\Delta\overline{V}_F}{\Delta\overline{V}_1} \tag{11}$$

Równoważna powierzchnia przełomu, wyliczana z $\Delta\overline{V}_F$ (utrata masy wyłącznie w wyniku pęknięcia-wykruszenia krawędzi w trakcie pierwszych testów) przy założeniu, że powierzchnia pęknięcia uzyskana w trakcie próby jest płaska i równoległa do jednego boku próbki (graniastosłupa)

$$S = \left(\frac{2 \cdot \Delta\overline{V}_F \cdot L}{\sin 60^\circ} \right)^{\frac{1}{2}}, \text{ mm}^2 \tag{12}$$

gdzie L – długość krawędzi próbki.

Tabela 4. Wyniki pomiarów wykonanych przy obciążeniu F_n = 1000 N, dla liczby obrotów i = 15 (ścierniwo – elektrokorund)

Table 4. Results from tests run at normal load, F_n = 1000 N and individual consecutive test durations, i = 15 revolutions (with alumina abradant)

Oznaczenie próbki węglików spiekanych	Wyniki pomiarów: średnia arytmetyczna i niepewność pomiaru $u_{cl}(\overline{m}_1)$						
	$\Delta\overline{m}_1$	$\Delta\overline{m}^a$	$\Delta\overline{m}^F$	$\Delta\overline{V}_1$	$\Delta\overline{V}_a$	$\Delta\overline{V}_F$	S_a
	mg			mm^3			mm^2
AWC1	**0,647** 0,057	**0,246** 0,012	**0,401** 0,063	**0,0445** 0,0039	**0,0169** 0,0008	**0,0276** 0,0043	**1,071**
AWC2	**0,542** 0,021	**0,217** 0,012	**0,325** 0,034	**0,0377** 0,0014	**0,0151** 0,0008	**0,0226** 0,0023	**0,969**
AWC3	**0,805** 0,088	**0,118** 0,016	**0,686** 0,072	**0,0553** 0,0060	**0,0081** 0,0011	**0,0471** 0,0049	**1,399**
AWC4	**0,966** 0,258	**0,123** 0,013	**0,843** 0,251	**0,0630** 0,0168	**0,0080** 0,0008	**0,0550** 0,0164	**1,512**
AWC5	**2,087** 0,093	**1,826** 0,043	**0,261** 0,102	**0,1542** 0,0068	**0,1349** 0,0031	**0,0192** 0,0075	**0,893**
AWC6	**2,193** 0,057	**1,999** 0,078	**0,191** 0,092	**0,1672** 0,0043	**0,1524** 0,0059	**0,0145** 0,0070	**0,776**

Tabela 5. Wskaźniki własności materiałów obliczone na podstawie wyników badań wykonanych przy obciążeniu F_n = 1000 N, dla liczby obrotów i = 15 (ścierniwo – elektrokorund)

Table 5. Property indicators calculated from test results run at normal load, F_n = 1000 N and individual consecutive test durations, i = 15 revolutions (with alumina abradant)

Oznaczenie próbki węglików spiekanych	Wyniki pomiarów: średnia arytmetyczna i niepewność pomiaru $u_{cl}(\overline{m}_1)$				
	AR	AR_V	FI	FR	FR_V
	obr/mg	obr/mm^3	–	obr/mg	obr/mm^3
AWC1	**60,9** 4,0	**884,2** 58,1	**0,616** 0,044	**37,4** 6,0	**543,0** 87,1
AWC2	**69,12** 4,0	**993,2** 57,5	**0,599** 0,039	**46,15** 5,0	**663,2** 71,8
AWC3	**127,1** 17,0	**1842,9** 247,3	**0,852** 0,004	**21,86** 2,27	**318,1** 33,0
AWC4	**121,1** 13,8	**1867,5** 211,4	**0,872** 0,037	**17,79** 6,62	**272,5** 101,4
AWC5	**8,21** 0,22	**111,1** 2,9	**0,125** 0,042	**57,47** 24,48	**777,6** 331,2
AWC6	**7,50** 0,30	**98,3** 3,9	**0,087** 0,041	**78,53** 37,80	**1029,5** 495,5

Tabela 6. Wyniki pomiarów wykonanych przy obciążeniu F_n = 1000 N, dla liczby obrotów i = 15 (ścierniwo – piasek kwarcowy).

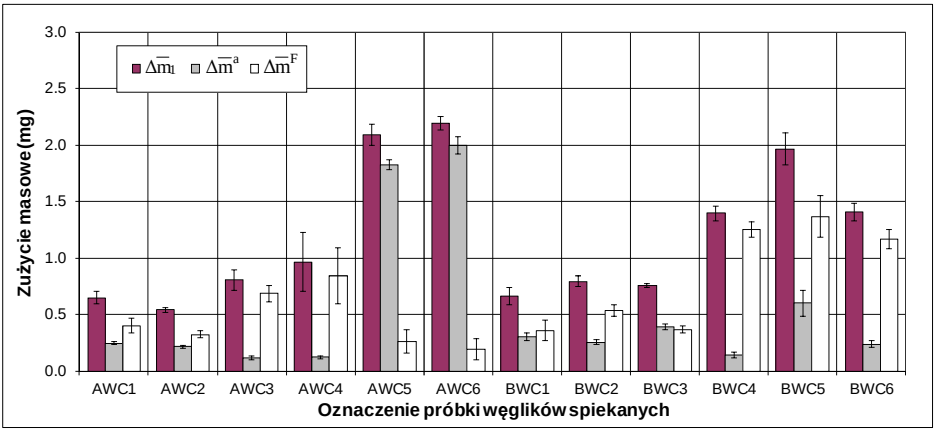
Table 6. Results from tests run at normal load, F_n = 1000 N and individual consecutive test durations, i = 15 revolutions (with sand abradant)

Oznaczenie próbki węglików spiekanych	Wyniki pomiarów: średnia arytmetyczna i niepewność pomiaru $u_{cl}(\overline{m}_l)$						
	$\Delta\overline{m}_l$	$\Delta\overline{m}^a$	$\Delta\overline{m}^F$	$\Delta\overline{V}_l$	$\Delta\overline{V}_a$	$\Delta\overline{V}_F$	S_a
	mg			mm^3			(mm^2)
BWC1	**0,66**	**0,30**	**0,36**	**0,05**	**0,02**	**0,02**	**1,011**
	0,080	0,032	0,086	0,007	0,003	0,006	
BWC2	**0,79**	**0,26**	**0,54**	**0,05**	**0,02**	**0,04**	**1,225**
	0,048	0,019	0,052	0,006	0,002	0,005	
BWC3	**0,75**	**0,39**	**0,37**	**0,05**	**0,03**	**0,03**	**1,043**
	0,016	0,027	0,031	0,006	0,003	0,003	
BWC4	**1,40**	**0,14**	**1,25**	**0,09**	**0,01**	**0,08**	**1,876**
	0,064	0,027	0,069	0,010	0,002	0,010	
BWC5	**1,96**	**0,60**	**1,36**	**0,13**	**0,04**	**0,09**	**1,955**
	0,140	0,118	0,184	0,016	0,009	0,015	
BWC6	**1,40**	**0,24**	**1,17**	**0,10**	**0,02**	**0,09**	**1,902**
	0,078	0,032	0,084	0,012	0,003	0,011	

Tabela 7. Wskaźniki własności materiałów obliczone na podstawie wyników badań wykonanych przy obciążeniu F_n = 1000 N, dla liczby obrotów i = 15 (ścierniwo – piasek kwarcowy)

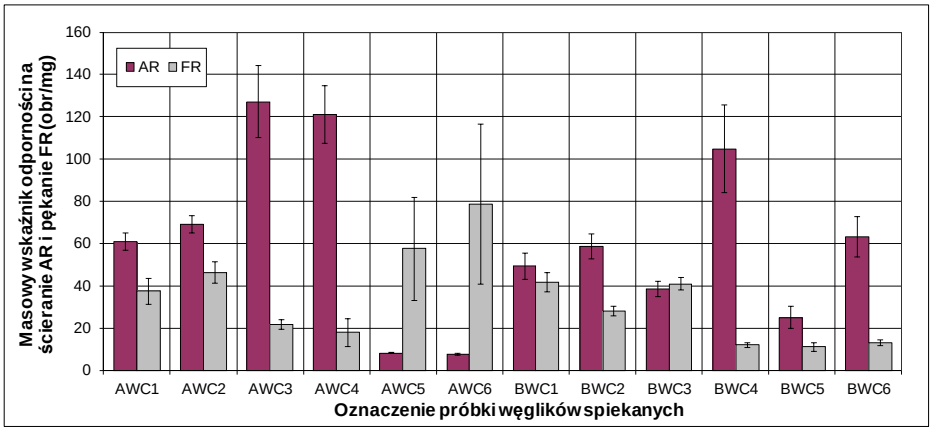
Table 7. Property indicators calculated from test results run at normal load, F_n = 1000 N and individual consecutive test durations, i = 15 revolutions (with sand abradant)

Oznaczenie próbki węglików spiekanych	Wyniki pomiarów: średnia arytmetyczna i niepewność pomiaru $u_{cl}(\overline{m}_l)$				
	AR	AR_v	FR	FR_v	FI
	obr/mg	obr/mm^3	obr/mg	obr/mm^3	---
BWC1	**49,32**	**720,00**	**41,76**	**609,74**	**0,54**
	6,167	48,050	4,541	40,835	0,137
BWC2	**58,63**	**873,62**	**27,91**	**415,81**	**0,68**
	5,920	58,271	2,357	27,799	0,073
BWC3	**38,66**	**541,26**	**40,97**	**573,61**	**0,49**
	3,695	36,130	3,011	38,291	0,042
BWC4	**104,65**	**1 548,84**	**11,97**	**177,13**	**0,90**
	20,741	103,305	1,148	11,932	0,075
BWC5	**25,04**	**371,91**	**10,99**	**163,20**	**0,70**
	5,217	25,015	2,147	11,167	0,135
BWC6	**63,16**	**846,32**	**12,87**	**172,41**	**0,83**
	9,382	56,476	1,381	11,642	0,088



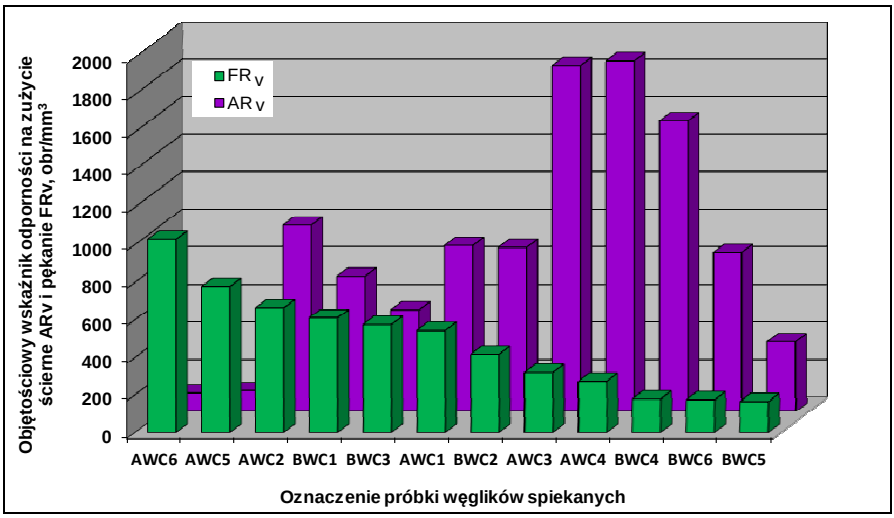
Rys. 4. Zużycie węglików spiekanych przy obciążeniu F_n = 1000 N i liczbie obrotów i = 15 (ścierniwo: Al_2O_3 dla węglików AWC i SiO_2 dla węglików BWC)

Fig. 4. Wear of hardmetals at normal load F_n = 1000 N and individual consecutive test durations i = 15 revolutions (abradant: Al_2O_3 for hardmetals AWC and SiO_2 for hardmetals BWC)



Rys. 5. Wykres wskaźników charakterystycznych dla węglików spiekanych przy obciążeniu F_n = 1000 N i liczbie obrotów i = 15 (ścierniwo: Al_2O_3 dla węglików AWC i SiO_2 dla węglików BWC)

Fig. 5. Graph of property indicators for hardmetals at normal load F_n = 1000 N and individual consecutive test durations i = 15 revolutions (abradant: Al_2O_3 for hardmetals AWC and SiO_2 for hardmetals BWC)



Rys. 6. Klasyfikacja węglików spiekanych według ich odporności na kruche pękanie FR_v i odpowiadająca jej odporność na zużycie ścierne AR_v, obr./mm^3

Fig. 6. Ranking of hardmetals according to their resistance to edge fracture FR_v and its corresponding resistance to abrasion wear AR_v, rev/mm^3

ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

W stabilnym etapie zużywania rozrzut wyników był nadzwyczajnie mały, co w połączeniu z bardzo dokładnym pomiarem ubytku masy czyni tę metodę bardzo dokładną i wrażliwą na zmianę wielkości parametru badanego. Nie umożliwia ona jednak wyznaczenia wartości odporności na kruche pękanie (np. K_{IC}) w sposób bezpośredni (np. metoda standaryzowana) **[L. 9]**. Zintegrowana metoda badań wymaga bowiem modeli (wzorów) teoretycznych lub empirycznych, które opisują zależność między odpornością na pękanie a innymi własnościami mechanicznymi. Wzory te zazwyczaj opierają się na powszechnie przyjętych założeniach i prawach, takich jak bilans energii, rozkład naprężeń Hertza lub na związkach empirycznych i półempirycznych, które okazały się być słuszne w określonym przedziale parametrów wymuszających **[L. 2–5, 11, 12]**.

Zgodnie z podanym na wstępie celem niniejszego opracowania, do dalszych analiz i oceny wyników przeprowadzonych badań wykorzystano poniższe wzory oraz przeprowadzono analizę wymiarową dla ich modyfikacji w celu uzyskania zgodności z wymiarem krytycznego współczynnika intensywności naprężeń:

a) Zależność w oparciu o badania Ścieszki i Filipowicza **[L. 12, 13]**.

$$K_C = \alpha\left(\frac{E}{H}\right)\left(\frac{1}{S}\right)(EI \cdot F_n)^{\frac{1}{2}} \tag{13}$$

gdzie: α – stała empiryczna; E – moduł sprężystości (moduł Younga), (GPa); H – twardość, (MPa); S – równoważna powierzchnia przełomu próbki, (mm^2); EI – energia włożona do systemu przez urządzenie badawcze w czasie próby (J); F_n – siła normalna obciążająca próbkę (N).

b) Zależność w oparciu o badanie Hornbogena **[L. 2]**. Według Hornbogena przejście z niestabilnego do stabilnego etapu zużywania ściernego jest równe zmianie prawdopodobieństwa tworzenia się cząstki zużycia. Prawdopodobieństwo to można odnieść do odkształcenia plastycznego ε_p tworzącego się w trakcie interakcji wierzchołków nierówności oraz odkształcenia krytycznego ε_c, przy którym w materiale zaczynają się rozchodzić pęknięcia. Jeżeli $\varepsilon_p > \varepsilon_c$, to istnieje zwiększone prawdopodobieństwo tworzenia się cząsteczki zużycia poprzez fragmentację (pęknięcie), stąd wielkość zużycia zależy od odporności na kruche pękanie

$$K_C = \beta\left(\frac{E^2}{H}\right)^{\frac{1}{4}}\left(\frac{1}{S}\right)^{\frac{1}{2}} F_n^{\frac{3}{4}} \tag{14}$$

gdzie β – stała empiryczna.

c) Zależność w oparciu o model empiryczny **[L. 4]** zużycia ściernego poprzez kruchy przełom, polegającego na usunięciu materiału w wyniku pękania poprzecznego. Stąd

$$K_C = \gamma\left(\frac{E}{H}\right)^2\left(\frac{1}{S}\right)^2\left(\frac{1}{H}\right)^{\frac{5}{4}} F_n^{\frac{9}{4}} \tag{15}$$

gdzie γ – stała empiryczna.

d) Zależność w oparciu o badanie Hussainova **[L. 3]** na zużycie erozyjne węglików spiekanych. Stąd

$$K_C = \delta\left(\frac{E}{H}\right)\tau_r\left(\frac{l^{\frac{3}{2}}}{S^{\frac{1}{2}}}\right) \tag{16}$$

gdzie: δ – stała empiryczna; τ_r – wytrzymałość ścierniwa na ścinanie (MPa); l – długość krawędzi próbki (mm).

e) Zależność w oparciu o badania empiryczne materiałów ceramicznych **[L. 7]**, w szczególności wysokiej czystości (99,99%) spieków proszków tlenku aluminium. Badania wykazały, że główny mechanizm zużycia generowany jest przez propagację pęknięć kruchych. Stąd

$$K_C = \vartheta\left(\frac{E}{H}\right)^{\frac{1}{2}}\left(\frac{\sigma_n}{S}\right)^{\frac{1}{2}}(EI)^{\frac{1}{2}} \tag{17}$$

gdzie: ϑ – stała empiryczna; σ_n – naprężenie ściskające w próbce ścierniwa (MPa).

Zakładając, że badanie z piaskiem jako ścierniwem jest standardowym warunkiem badań, to wyniki uzyskane z badań, w których np. ścierniwem był elektrokorund, można przeliczyć (lub standaryzować), stosując równania (18–21). O skalowaniu wyników badań węglików spiekanych względem wartości wytrzymałości ścierniwa na ścinanie zdecydowano na podstawie przeprowadzonych badań **[L. 16]**, które wykazały istotny wpływ tej własności ścierniwa na obciążenie próbki.

$$FR_S \cong \frac{\tau_a}{\tau_s} \cdot FR_a \tag{18}$$

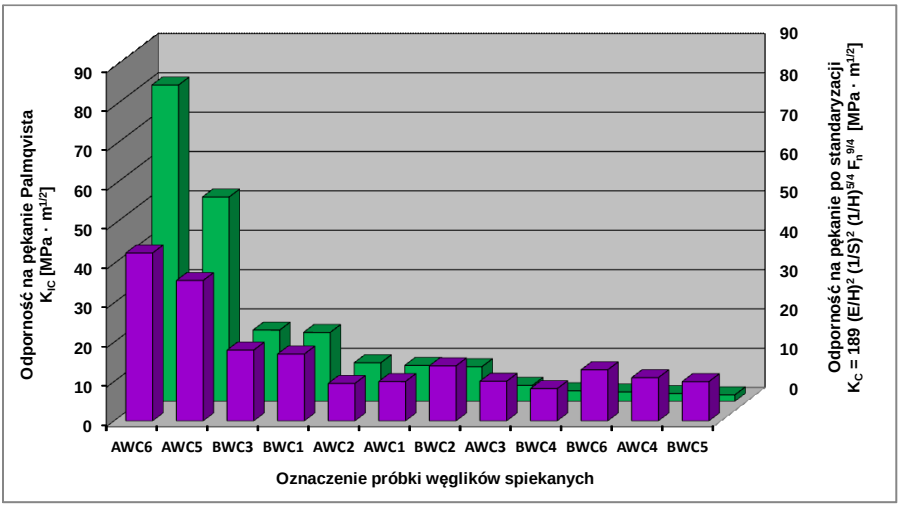
$$AR_S \cong \frac{IA_a}{IA_s} \cdot AR_a \tag{19}$$

$$FI_S \cong \frac{\tau_s}{\tau_a} \cdot FI_a \tag{20}$$

$$S_S \cong \sqrt{\frac{\tau_s}{\tau_a}} \cdot S_a \tag{21}$$

gdzie: τ_s – wytrzymałość piasku na ścinanie **(Tabela 2)**; τ_a – wytrzymałość elektrokorundu na ścinanie **(Tabela 2)**; IA_s – ścieralność piasku **(Tabela 2)**; IA_a – ścieralność elektrokorundu **(Tabela 2)**; S_a – równoważna powierzchnia przełomu dla elektrokorundu **(Tabela 4)**; S_s – równoważna powierzchnia przełomu dla piasku **(Tabela 6)**; AR_a – wskaźnik odporności na ścieranie dla elektrokorundu **(Tabela 5)**; AR_s – wskaźnik odporności na ścieranie dla piasku **(Tabela 7)**; FR_a – wskaźnik odporności na kruche pękanie dla elektrokorundu **(Tabela 5)**; FR_s – wskaźnik odporności na kruche pękanie dla piasku **(Tabela 7)**; FI_a – bezwymiarowy wskaźnik wykruszeń dla elektrokorundu **(Tabela 5)**; FI_s – bezwymiarowy wskaźnik wykruszeń dla piasku **(Tabela 7)**.

W ostatnim etapie analizy wyników badań podjęto próbę przedstawienia zależności empirycznej między zużyciem wskutek wykruszania krawędzi podczas początkowego etapu przejścia zużycia ściernego a odpornością na pękanie. W **Tabeli 10** zamieszczono wartości współczynnika determinacji dla różnych równań i relacji.



Rys. 7. Klasyfikacja węglików spiekanych według odporności na pękanie Palmqvista K_{IC} oraz odporności na pękanie K_C uzyskanej z modelu empirycznego na zużycie ścierne przez kruche pękanie i usuwanie materiału za pomocą bocznego pękania (22)

Fig. 7. Ranking of hardmetals according to their Palmqvist toughness K_{IC} and the results calculated from the empirical model for the abrasive wear by brittle fracture and the removal of material by the lateral cracking (Eq. (22))

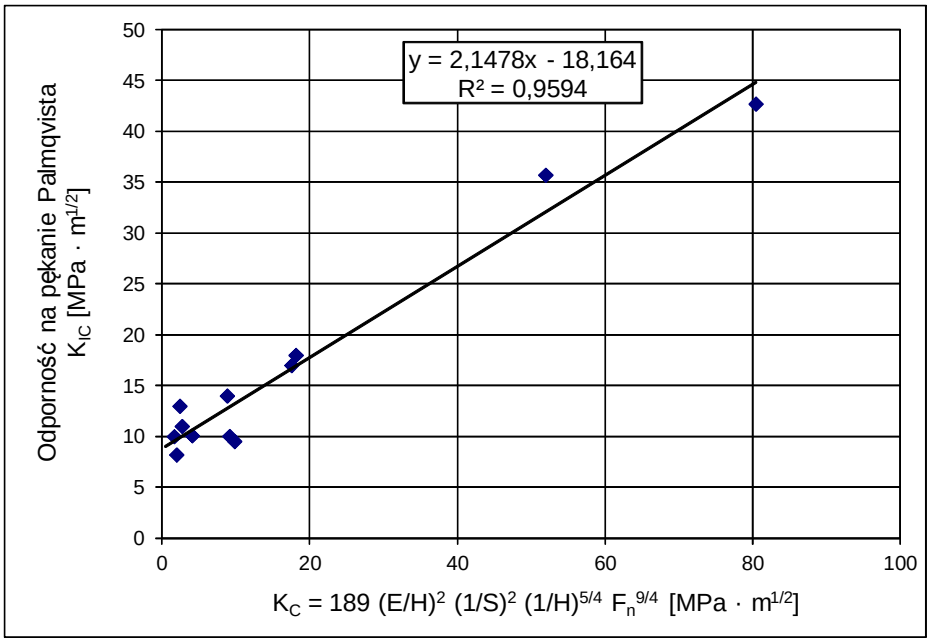
Tabela 10. Wartości współczynnika determinacji R^2 dla różnych równań i relacji

Table 10. The coefficient of determination R^2 values, for various equations and relationships

Równanie i relacja	Testy z Al_2O_3	Testy z SiO_2	Nr równania
$K_C = \alpha\left(\frac{E}{H}\right)\left(\frac{1}{S}\right)(EI \cdot F_n)^{\frac{1}{2}}$	0,9110	0,8952	(13)
$K_C = \beta\left(\frac{E^2}{H}\right)^{\frac{1}{4}}\left(\frac{1}{S}\right)^{\frac{1}{2}} F_n^{\frac{3}{4}}$	0,6988	0,8286	(14)
$K_C = \gamma\left(\frac{E}{H}\right)^2\left(\frac{1}{S}\right)^2\left(\frac{1}{H}\right)^{\frac{5}{4}} F_n^{\frac{9}{4}}$	0,9751	0,9252	(15)
$K_C = \delta\left(\frac{E}{H}\right)\tau_r\left(\frac{l^{\frac{3}{2}}}{S^{\frac{1}{2}}}\right)$	0,8994	0,9147	(16)
$K_C = \vartheta\left(\frac{E}{H}\right)^{\frac{1}{2}}\left(\frac{\sigma_n}{S}\right)^{\frac{1}{2}}(EI)^{\frac{1}{2}}$	0,8865	0,8716	(17)
K_C vs. FR	0,7818	0,9426	(9)
K_C vs. FR_V	0,7382	0,9223	(10)
K_C vs. FI	0,8908	0,7308	(11)

Dla zestawu badanych materiałów najlepszą korelację (R^2 = 0,9594) obliczoną dla obu ścierniw po standaryzacji równaniem (22) otrzymano dla modelu empirycznego na zużycie ścierne przez kruche pękanie i usuwanie materiału za pomocą poprzecznego pękania **(Rys. 8)**:

$$K_C = 189\left(\frac{E}{H}\right)^2\left(\frac{1}{S}\right)^2\left(\frac{1}{H}\right)^{\frac{5}{4}} F_n^{\frac{9}{4}} \tag{22}$$



Rys. 8. Korelacja pomiędzy wynikami testu odporności na pękanie Palmqvista a wynikami obliczeń za pomocą modelu empirycznego na zużycie ścierne przez kruche pękanie i usuwanie materiału za pomocą bocznego pękania (22)

Fig. 8. The correlation between Palmqvist toughness test results and the results calculated from the empirical model for the abrasive wear by brittle fracture and the removal of material by the lateral cracking (Eq. (22))

WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań wybranych gatunków węglików spiekanych stwierdza się, że:

1. Ścieralność materiałów sypkich (AF i IA) jest relatywnie różna w zależności od rodzaju materiału próbki, czyli gatunku węglika spiekanego. Dlatego właściwości ścierne surowców skalnych należy badać w kontakcie z próbkami wykonanymi z materiałów obecnie stosowanych lub rozważanych do użycia w urządzeniu.

2. Zużycie ścierne jest procesem złożonym i zmienia się w zależności od warunków. Własności materiałowe dla takiego systemu tribologicznego mogą być określone jedynie przez starannie zaprojektowaną symulację, w której elementy mechaniczne poddaje się procesom podobnym do skomplikowanych warunków technicznych. Jeśli np. środowisko techniczne obejmuje takie procesy jak zużycie ścierne, pękanie materiału i redukcję wielkości cząstek ścierniwa, to wszystkie te procesy muszą być włączone do symulacji.
3. Przedstawiona metoda łącznego badania odporności na ścieranie i pękanie wraz z procedurą badań oferuje potencjalne korzyści przy stosowaniu w programie rozwoju węglików spiekanych do klasyfikacji materiałów pod względem wspomnianych własności użytkowych.
4. Metoda umożliwia ocenę zarówno odporności na ścieranie, jak i pękanie za pomocą tylko jednego stanowiska laboratoryjnego, jednego kształtu próbki i jednej procedury badań. Metoda oparta jest na stwierdzeniu, że przejściowy etap zużycia, typowy dla początkowego i niestabilnego procesu zużycia, jest kontrolowany przez kruche pękanie, natomiast etap stacjonarny jest kontrolowany przez proces zużycia ściernego.
5. Ponieważ jakość powierzchni próbek wpływa na wielkość wykruszeń krawędzi, to zaleca się, aby stosować tylko jeden rodzaj procedury końcowej obróbki powierzchni dla wszystkich próbek. Zaleca się również stosowanie profilometru dla wyznaczenia charakterystyk powierzchni próbek przed badaniami tribologicznymi.
6. Zaprezentowana metoda badań nie umożliwia wyznaczenia odporności na kruche pękanie (np. K_c) w sposób bezpośredni (np. standaryzowana próba badania odporności na kruche pękanie). Zintegrowana metoda badań wymaga modeli (wzorów) teoretycznych lub empirycznych, które opisują zależność między odpornością na pękanie a innymi własnościami mechanicznymi.

LITERATURA

1. GASTM Designation: G65-04(2010) Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus, 2010.
2. Hornbogen E.: The role of fracture toughness in the wear of materials. Wear, 33, 1975, 251–259.
3. Hussainova I., Antonov M., Zikin A.: Erosive wear of advanced composites based on WC. Tribology International 2012; 46: 254–260.
4. Hutchings I.M.: Tribology, Friction and Wear of Engineering Materials. Arnold, London, 1992, 153.
5. Hutchings I.M.: Wear by particulates. Chem. Eng. Sci. 1987; 42: 869–878.
6. Lawn B.: Fracture of brittle solids. Cambridge University Press, 1995.

7. Rico A., Orgaz F., Rodriquez J.: Wear prediction from energy considerations in alumina with different grain size. 5th World Tribology Congress. Torino, September 8–13, 2013.
8. Roberts S.G.: Hertzian Testing of ceramics. British Ceramic Transactions, 99, 1, 2000, 31–38.
9. Roebuck B., Gee M., Bennett E.G., Morrell R.: Mechanical Tests for Hardmetal, NPL Good Practice Guide, 20, Teddington, 2000.
10. Ścieszka S.F.: Abrasion and edge fracture resistance estimation of hard materials by tribotesting method. Tribotest 2007; 13: 103–113.
11. Ścieszka S.F.: Simultaneous abrasion and edge fracture resistance estimation of hard materials by the tribotesting method. ZEM 2011; 166, 2: 55–104.
12. Ścieszka S.F., Filipowicz K.: An integrated testing method for cermet abrasion resistance and fracture toughness evaluation. Wear, 216, 1998, 202–210.
13. Ścieszka S.F.: Wear transition as a means of fracture toughness evaluation of hard-metals. Tribology Letters, 11, 3-4, 2001, 185–194.
14. Ścieszka S.F., Grzegorzek W., Żołnierz M.: Tribotesting system for hardmetals mechanical characterization. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. 41, 2013, 470–482.
15. Ścieszka S.F., Grzegorzek W., Żołnierz M.: Tribotesting system for hardmetals mechanical characterization. 5th World Tribology Congress. Torino, September 8–13, 2013.
16. Ścieszka S.F., Grzegorzek W., Żołnierz M.: A technique to investigate pulverising and abrasive properties of bulk materials. Sci. Probl. Mach. Oper. Maint. 2011 vol. 46 z. 4, s. 91–100.
17. Zeng K., Breder K., Rowcliffe D.J.: The Hertzian stress field and formation of cone cracks. Acta Meetall. Mater. 40, 10, 1992, 2505–2605.

Summary

The work presents the results of using a simple and reliable integrated testing method in which conjoin actions involving the fracture and abrasion of hardmetals together with abradant particle comminution is carefully monitored and analysed. The presented system approach to tribotesting enables the mechanical characterization of hardmetals in attrition contact with granular minerals, which takes place in, e.g., mineral processing or in drilling action. The results from this testing show that, by using one apparatus and test specimen shape, it is possible to obtain a reliable rating of hardmetals according to both criteria, which is their fracture toughness as well as their resistance to abrasion in rubbing contact with the abradant. The integrated testing method required a theoretical or empirical model that describes the relationship between fracture toughness, other mechanical properties, and the test's fracture indicator. For the range of materials tested, the best correlation received was for the empirical model for the removal of brittle material by lateral cracking.