
PRACE

**Instytutu Szkła, Ceramiki
Materiałów Ogniotrwałych
i Budowlanych**

Scientific Works
of Institute of Glass, Ceramics
Refractory and Construction Materials

Nr 4

ISSN 1899-3230

Rok II

Warszawa–Opole 2009

*IZABELA MAJCHROWICZ**

*ALICJA PAWELEK***

*HALINA WAŁĘGA****

Odporność na ścieranie materiałów ogniotrwałych i metody jej oznaczania

Przedstawiono dwie metody oznaczania odporności na ścieranie materiałów ceramicznych stosowane w Oddziale Materiałów Ogniotrwałych w Gliwicach. Pierwsza, opracowana w OMO, pozwala określić odporność na ścieranie materiałów zarówno w temperaturze otoczenia, jak i w 1000°C. Druga metoda, oparta o normę ASTM G 65-04, wprowadzona została do stosowania w ramach badań nad opracowaniem kompozytów ceramicznych o zwiększonej odporności na ścieranie. Przedstawiono rezultaty oznaczeń ścieralności przyjętej jak miara odporności na ścieranie betonów ogniotrwałych i kompozytów ceramicznych uzyskane tymi metodami. Ze względu na brak możliwości porównania wyników z obu metod, wskazano na konieczność umieszczenia informacji dotyczącej zastosowanej metody przy podawaniu wielkości charakteryzujących odporności na ścieranie materiałów.

1. Wstęp

Wiele procesów przemysłowych wymaga zastosowania materiałów ogniotrwałych o wysokiej odporności na ścieranie m.in. w celu skrócenia czasu postoju urządzeń pracujących w środowisku ścierającym, zwiększenia efektywności procesu, a także, by poprawić jakość wytwarzanego produktu przez obniżenie zawartości zanieczyszczeń, które mogą powstać w trakcie procesu ścierania. Jako typowe przykłady procesów ścierających, niszczących obmurza ogniotrwałe, wymienić można ruchy kawałków złomu podczas roztapiania wsadu w konwertorach stalowniczych, piecach indukcyjnych itp., ruch wsadu w cementowniczych piecach obrotowych, przesypywanie się klinkieru w chłodniakach tychże pieców, ruch wsadu w piecach szybowych, przepływ masy szkła wzdłuż ścian wanny szklarskiej i in.

* Mgr inż., Instytut Szkła, Ceramiki, Materiałów Ogniotrwałych i Budowlanych w Warszawie, Oddział Materiałów Ogniotrwałych w Gliwicach.

** Dr inż., Instytut Szkła, Ceramiki, Materiałów Ogniotrwałych i Budowlanych w Warszawie, Oddział Materiałów Ogniotrwałych w Gliwicach.

*** Mgr inż., Instytut Szkła, Ceramiki, Materiałów Ogniotrwałych i Budowlanych w Warszawie, Oddział Materiałów Ogniotrwałych w Gliwicach.

Przyjmuje się, że odporność wyrobów ogniotrwałych na ścieranie jest proporcjonalna do wytrzymałości mechanicznej. Ponadto, znaleziono dla wyrobów glinokrzemianowych i węglowych (z wyjątkiem materiałów gruboziarnistych) hiperboliczną zależność pomiędzy wskaźnikiem ścieralności a współczynnikiem sprężystości – im większy moduł Younga, tym większa odporność na ścieranie [1]. O zachowaniu się materiałów w trudnych warunkach ścierania decyduje również szereg innych parametrów [2, 3].

Wysoką odporność na ścieranie wykazują najtwardsze tworzywa ogniotrwałe: karborundowe, korundowe, większość topionych, niektóre spieki, zwłaszcza nietlenkowe. Szczególnie niską odporność na ścieranie posiadają wyroby izolacyjne.

W Oddziale Materiałów Ogniotrwałych w Gliwicach od wielu lat prowadzone są badania nad opracowaniem tworzyw ogniotrwałych odpornych na ścieranie. Dotyczy to zarówno materiałów formowanych, jak i betonów ogniotrwałych.

2. Metody oznaczania odporności na ścieranie

W literaturze technicznej znaleźć można opisy metod oznaczania odporności na ścieranie materiałów ogniotrwałych. Opierają się one zwykle na stosowaniu, przy różnych rozwiązaniach aparaturowych, sił trących, szlifujących lub uderzających. Jako czynnik ścierający wykorzystuje się strumień powietrzny piasku, tarcze szlifierskie, mechanizmy uderzające i rysujące. Metody te przewidziane są zwykle do zastosowania w temperaturze pokojowej, natomiast w przypadku badania materiałów ogniotrwałych ważna jest także wiedza na temat ich odporności na ścieranie w wysokich temperaturach, co odzwierciedla realne warunki robocze. Spoistość tworzyw może bowiem ulec po ogrzaniu znacznym zmianom (aż do objawów mięknięcia).

W związku z powyższym w Oddziale Materiałów Ogniotrwałych opracowano metodę oznaczania odporności na ścieranie w temperaturze otoczenia i 1000°C. Metoda ta polega na określeniu ubytku masy próbki ścieranej ściernicą o określonych własnościach, przy określonej szybkości obrotów i w określonym czasie. Próbkę do oznaczeń tą metodą wycina się z wyrobu wypalonego lub niewypalonego, lub formuje się z masy. Wymiary próbek powinny wynosić 95 mm x 60 mm x 25 mm. Następnie oczyszcza się powierzchnie próbek, suszy do stałej masy w temperaturze 105–110°C i waży z dokładnością do 0,1 g.

Aparatura do oznaczenia odporności na ścieranie składa się z wiertarki z zamontowaną ściernicą oraz pieca elektrycznego.

Ściernica wykonuje 310 obrotów na minutę, ścierając dwa wycinki powierzchni o wielkości 2,6 cm². Ścieranie wykonuje się w ciągu 10 minut, a miarą odporności na ścieranie jest ubytek masy próbki. W ten sposób oznacza się ście-

ralność materiałów w temperaturze otoczenia. Dla wykonania pomiaru w temperaturze 1000°C próbkę ogrzewa się w piecu elektrycznym, przetrzymuje 20 minut w najwyższej temperaturze (celem wyrównania temperatury w próbce), a następnie w ciągu 10 minut prowadzi się proces ścierania. Z reguły ścieralność oznacza się w temperaturze otoczenia i 1000°C na tej samej próbce, wykorzystując równoległe powierzchnie próbki. Do jednego pomiaru ścieralności służy jedna ściernica.

Ścieralność S oblicza się ze wzoru:

$$S = \frac{(a-b)}{F} \text{ [g/cm}^2\text{]} \quad (1)$$

gdzie:

S – ścieralność [g/cm²],

a – masa próbki przed ścieraniem [g],

b – masa próbki po ścieraniu [g],

F – ścierana powierzchnia kształtki [cm²].

W OMO za pomocą powyższej metody prowadzone są oznaczenia ścieralności wielu materiałów ogniotrwiałych. Poniżej przedstawione zostaną przykładowo wyniki badań betonów ogniotrwiałych przeznaczonych do zastosowań jako wyłożenie ogniotrwale urządzeń grzewczych, w których panują ostre warunki ścierające.

W badaniach nad otrzymaniem betonów ogniotrwiałych odpornych na ścieranie skupiono się nad wykorzystaniem kruszywa odpornego na ścieranie lub nad modyfikacją składu osnowy betonu BN-145 przez 1 i 2% dodatek tlenku cyrkonu. Wyniki tych badań zobrazowano w tabeli 1 i 2 oraz na rycinach 1 i 2. Oznaczenia własności tych betonów wykonano po ich wypaleniu w temperaturze stosowania.

T a b e l a 1

Własności betonów z udziałem kruszyw odpornych na ścieranie

Rodzaj betonu	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]	Gęstość pozorna [g/cm ³]	Porowatość otwarta [%]	Skurczliwość liniowa [%]	Ścieralność [g/cm ²]	
					w 20°C	w 1000°C
Beton z udziałem kruszywa I	92,0	3,07	14,1	-0,79	0,12	0,03
Beton z udziałem kruszywa II	92,8	2,00	11,0	-0,80	0,17	0,19
Beton z udziałem kruszywa III	68,1	2,37	22,1	-0,39	0,00	0,02

Ź r ó ł o: Opracowanie własne.

Tabela 2

Właściwości betonu BN-145 przed i po modyfikacji

Rodzaj betonu	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]	Gęstość pozorna [g/cm ³]	Porowatość otwarta [%]	Skurczliwość liniowa [%]	Ścieralność [g/cm ²]	
					w 20°C	w 1000°C
Beton BN-145	85,3	2,46	14,9	+0,20	0,21	0,05
Beton BN-145 + 1% ZrO ₂	61,5	2,37	16,8	-0,40	0,16	0,04
Beton BN-145 + 2% ZrO ₂	57,2	2,39	16,6	-0,40	0,45	0,04

Źródło: Opracowanie własne.

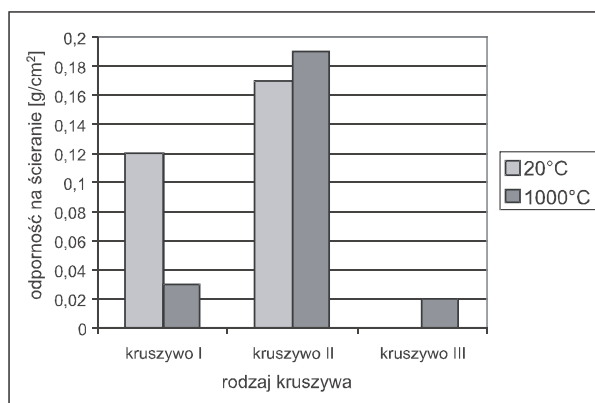
Analizując wyniki zawarte w tabelach 1 i 2 można stwierdzić, że odporność na ścieranie betonów ogniotrwałych zależy zarówno od zastosowanego kruszywa, jak i od składu osnowy. Wyniki badań przedstawione w tabeli 1 i na rycinie 1 świadczą o tym, że najlepszą odpornością na ścieranie cechował się beton zawierający w swoim składzie kruszywo oznaczone liczbą III. W temperaturze otoczenia materiał ten w ogóle nie uległ zniszczeniu ścierającemu, natomiast w temperaturze 1000°C wykazał nieznaczną podatność na ścieranie (0,02 g/cm²). Betony z udziałem kruszywa II i III posiadały gorszą odporność na ścieranie w temperaturze 1000°C w porównaniu do tej odporności w temperaturze otoczenia. Z kolei w przypadku betonu z udziałem kruszywa I obserwujemy zjawisko odmienne, mianowicie w temperaturze otoczenia materiał ten posiadał gorszą odporność na ścieranie niż w temperaturze 1000°C.

Modyfikacja składu osnowy betonu BN-145 za pomocą dodatku tlenku cyrkonu (tab. 2, ryc. 2) poprawiła jego odporność na ścieranie, ale tylko przy 1% zawartości ZrO₂. Zwiększenie tego dodatku do 2% znacznie pogorszyło tę odporność w temperaturze otoczenia (z 0,16 do 0,45 g/cm²), podczas gdy odporność na ścieranie w temperaturze 1000°C pozostała bez zmian.

W ostatnim okresie coraz większego znaczenia nabierają materiały ogniotrwałe o wysokiej odporności na ścieranie, wchodzące w miejsce dotychczas stosowanych wyrobów z metali lub węglików spiekanych. Wyroby te narażone są głównie na ścieranie, a więc ten wskaźnik jest decydujący o ich zdolnościach eksploatacyjnych. Prowadzona w OMO praca na temat kompozytów ceramicznych ZrO₂/WC (tworzyw o zwiększonej odporności na ścieranie porównywalnej z odpornością węgla bora) wymogła zastosowanie metody badawczej obejmującej tę klasę ceramicznych tworzyw ogniotrwałych. Analiza stosowanych

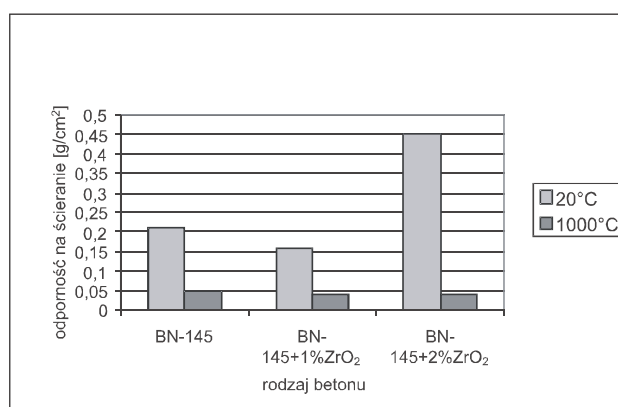
metod badawczych oraz wyniki badań otrzymane w Akademii Górniczo-Hutniczej – Katedra Ceramiki Specjalnej wykazały, że najodpowiedniejszą procedurę posiada amerykańska norma ASTM G 65-04 [4]. Norma ta obejmuje metodykę badań zarówno stopów metalicznych, jak i tworzyw ceramicznych o zwiększonej odporności na ścieranie.

Testy ścieralności według powyższej metody obejmują ścieranie próbek za pomocą piasku o określonych parametrach, który wprowadza się pomiędzy próbkę a obracające się koło, wyposażone w wykładzinę z kauczuku. Próbka testowa przyciskana jest z określoną siłą do obracającego się koła za pomocą dźwigni obciążonej ciężarkami, a piasek o kontrolowanym przepływie ściera powierzchnię próbki. Koło obraca się w kierunku zgodnym z kierunkiem przepływu piasku (ryc. 3).



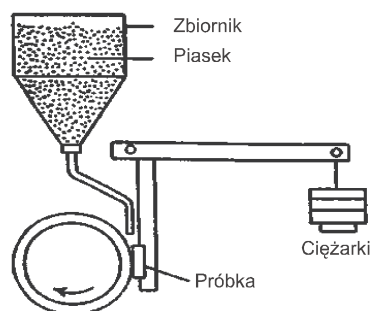
Źródło: Opracowanie własne.

Ryc. 1. Ścieralność betonów z udziałem kruszyw specjalnych



Źródło: Opracowanie własne.

Ryc. 2. Ścieralność betonów ogniotrwiałych z dodatkiem ZrO₂



Koło z wykładziną kauczukową

Źródło: ASTM G 65-04.

Ryc. 3. Aparatura do badania odporności na ścieranie wg ASTM G 65-04

Próbki o znanej gęstości pozornej waży się przed i po przeprowadzeniu testu, w celu określenia straty ich masy w trakcie ścierania. Następnie przelicza się stratę masy na stratę objętości ze wzoru:

$$\text{Strata objętości [mm}^3] = \frac{\text{strata} \cdot \text{masy} \cdot [\text{g}]}{\text{gęstość pozorna} \cdot [\text{g / cm}^3]} \cdot 1000 \quad (2)$$

Ścierana powierzchnia próbek powinna być gładka i mieć wymiary 25 mm x 76 mm, a grubość próbek może wahać się w granicach 3,2–12,7 mm. Prędkość przepływu piasku ustala się od 300 do 400 g/min. Czas wykonania oznaczenia wynosi, w zależności od ustalonej procedury, 30 min, 10 min, 5 min lub 30 sek. Badania ścieralności można przeprowadzić według pięciu procedur, które różnią się wielkością siły docisku próbki do koła i liczbą obrotów koła (tab. 3):

Tabela 3

Procedury ujęte w normie ASTM G 65-04

Procedura	Siła docisku [N]	Liczba obrotów
A	130	6 000
B	130	2 000
C	130	100
D	45	6 000
E	130	1 000

Źródło: Opracowanie własne.

W procedurze A badany materiał poddaje się działaniu bardzo ostrych warunków ścierających. Jest ona szczególnie przydatna w ocenie materiałów cechujących się odpornością na ścieranie w zakresie od średniej do wysokiej.

Procedurę B można stosować do badania materiałów o średniej i niskiej odporności na ścieranie. Powinna być stosowana, gdy wartości straty objętości otrzymane za pomocą procedury A przekraczają 100 mm³.

Procedurę C stosuje się do badania cienkich powłok.

Procedura D przeznaczona jest do oceny materiałów o niskiej odporności na ścieranie.

Procedura E jest krótszą w czasie odmianą procedury B do stosowania w badaniu materiałów o średniej i niskiej odporności na ścieranie.

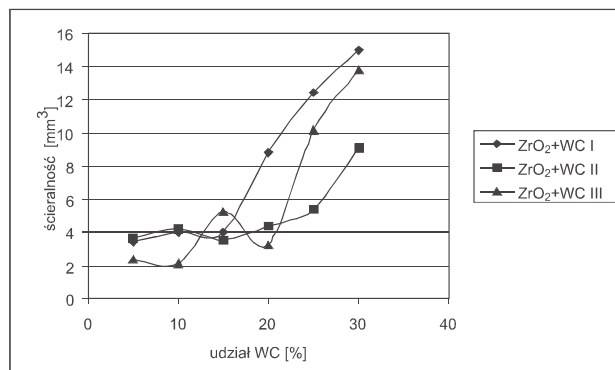
W tabeli 4 oraz na rycinie 4 przedstawiono przykładowe wyniki badań odporności na ścieranie opracowanych w Oddziale Materiałów Ogniotrwałych kompozytów ZrO₂/WC i dla porównania ceramiki z ZrO₂.

Tabela 4

Odporność na ścieranie kompozytów ZrO₂/WC i tworzyw cyrkonowych

Rodzaj tworzywa	Udział % dodatku	Gęstość pozorna [g/cm ³]	Strata masy [g]	Ścieralność [mm ³]
ZrO ₂ + WC I	5	6,47	0,0223	3,44
	10	6,96	0,0279	4,01
	15	7,24	0,0292	4,04
	20	7,27	0,0641	8,82
	25	7,33	0,0910	12,42
	30	7,35	0,1103	15,00
ZrO ₂ + WC II	5	6,45	0,0236	3,66
	10	6,94	0,0293	4,23
	15	7,24	0,0260	3,59
	20	7,47	0,0329	4,40
	25	7,72	0,0418	5,41
	30	8,03	0,0732	9,11
ZrO ₂ + WC III	5	6,37	0,0151	2,37
	10	6,70	0,0143	2,14
	15	7,05	0,0371	5,26
	20	7,17	0,0235	3,28
	25	7,23	0,0735	10,16
	30	7,46	0,1029	13,80
ZrO ₂ IV	–	6,03	0,0323	5,36
ZrO ₂ V	–	5,59	0,0134	2,39
ZrO ₂ VI	–	6,04	0,0279	4,62

Źródło: Opracowanie własne.



Ź r ó ł o: Opracowanie własne.

Ryc. 4. Odporność na ścieranie kompozytów ZrO₂/WC

Metoda oparta na amerykańskiej normie ASTM G 65-04 wykorzystana została również do określenia ścieralności betonów ogniotrwałych. Wyniki otrzymane za pomocą tej metody porównano z rezultatami oznaczeń ścieralności uzyskanymi metodą opracowaną w Oddziale Materiałów Ogniotrwałych, a przedstawioną w niniejszym opracowaniu jako pierwsza. Przy badaniach metodą ASTM zastosowano procedurę B – siła docisku próbki do obracającego się koła wynosiła 130 N, a koło wykonało 2000 obrotów. Betony wykorzystane w tych badaniach zawierały w swoim składzie kruszywo II, a różniły się między sobą składem osnowy. Próbkę oznaczono symbolami A, B i C. Wyniki badań przedstawia tabela 5.

T a b e l a 5

Wyniki badań porównawczych odporności na ścieranie betonów ogniotrwałych

Rodzaj betonu	Ścieralność wg metody IMO [g/cm ²]	Ścieralność wg ASTM G 65-04 [mm ³]
A	0,17	209,3
B	0,17	246,7
C	0,14	355,3

Ź r ó ł o: Opracowanie własne.

Jak łatwo zauważyć analizując dane zamieszczone w powyższej tabeli, obie zastosowane metody dały nieporównywalne wyniki nie tylko ze względu na jednostki jakimi scharakteryzowano ścieralność w obydwu metodach. Zastosowana metoda w istotny sposób wpływa również na rezultat, czego powodem jest najprawdopodobniej różnica w zachowaniu się materiału w zależności od warunków jego ścierania. W związku z tym ważne jest, aby przy podawaniu wielkości związanych z odpornością materiału na ścieranie, umieszczać informację na temat zastosowanej w tych oznaczeniach metody.

3. Podsumowanie

- Stosowane w praktyce metody oznaczania odporności na ścieranie opierają się na różnych zasadach, wyniki oznaczeń wyrażane są w różnych jednostkach.
- Porównanie wyników badań wykonanych za pomocą różnych metod wykazuje rozbieżności, które, jak w podanych przypadkach, wskazują na odmienne warunki ścierania materiałów w obu metodach.
- Analizując dane dotyczące własności niefizycznych, a więc zależnych od zastosowanego sposobu oznaczania, konieczne jest zwrócenie uwagi na użytą metodykę.

Literatura

- [1] N a d a c h o w s k i F., *Zarys technologii materiałów ogniotrwiałych*, Śląskie Wydawnictwo Techniczne, Katowice 1995.
- [2] B e n g i s u M., *Engineering ceramics*, Springer, 2001.
- [3] B l a u P.J., S c o t t D.H., *Wear*, „ASM International” 1992.
- [4] ASTM G 65-04: Standard test method for measuring abrasion using the dry sand/rubber wheel apparatus.

IZABELA MAJCHROWICZ
ALICJA PAWEŁEK
HALINA WAŁĘGA

WEAR RESISTANCE OF REFRACTORY MATERIALS AND ITS EVALUATION METHODS

Two methods of wear resistance evaluation of ceramic materials using in Department of Refractory Materials in Gliwice (OMO) was presented. The first method was developed in OMO and applied to abrasive resistance evaluation of materials at ambient temperature and at 1000°C. The second one, based on ASTM G 65-04, was introduced in OMO during development of ceramic composites with improved wear resistance. The results of abrasive resistance evaluation of refractory castables and ceramic composites by these methods was presented. Because of poor comparativeness of these results, a necessity of information about used method in test report is recommended.