

## WADY POWIERZCHNIOWE CERAMICZNYCH ELEMENTÓW TOCZNYCH

Waldemar KARASZEWSKI \*

\*Katedra Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn, Wydział Mechaniczny, Politechnika Gdańska,  
ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk

[w.karaszewski@wp.pl](mailto:w.karaszewski@wp.pl)

**Streszczenie:** Materiały ceramiczne posiadają kombinację optymalnych własności, które są niezbędne w zastosowaniach na wysoko obciążone elementy maszyn. Podstawowym problemem związanym z wytrzymałością zmęczeniową materiałów ceramicznych są wszelkiego rodzaju wady powierzchniowe będące efektem procesu wytwarzania lub wynikające z defektów struktury materiału ceramicznego. W artykule przedstawiono badania doświadczalne dwutlenku cyrkonu ze sztucznie wprowadzonymi, kontrolowanymi pęknięciami kolistym. Badania dwutlenku cyrkonu w postaci kulek prowadzono w układzie czterokulowym przy smarowaniu olejem.

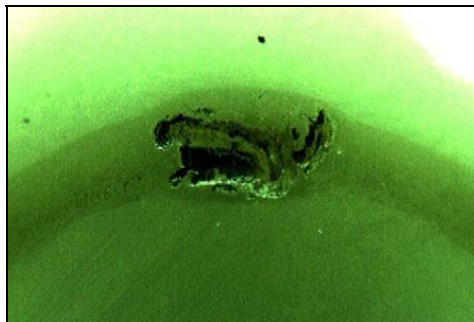
### 1. WSTĘP

Badania form zniszczenia kulek ceramicznych przeznaczonych na łożyska toczne w warunkach prowadzących do zmęczenia powierzchniowego niedwuznacznie wykazały (Hadfield i inni, 1993a, b, d) że współczesne metody wytwarzania i kontroli jakości są w stanie zapewnić odpowiednią jakość struktury wewnętrznej kulek gwarantującą ich wysoką powierzchniową wytrzymałość zmęczeniową. Elementy ceramiczne wolne od wad strukturalnych i pozbawione mikropełnięć powstałych w wyniku obróbki wykańczającej uzyskuje się dzięki rygorystycznej kontroli każdego elementu. Celem zmniejszenia odrzutów stosuje się specjalne metody wykańczania powierzchni kruchych materiałów ceramicznych. Jest to wszystko powodem wysokich kosztów związanych z produkcją elementów ceramicznych o wymaganej jakości. Rozwiązaniem tego problemu wydaje się być dopuszczenie do zastosowań praktycznych elementów z wadami, których wielkość i intensywność występowania mogłaby być tolerowana w warunkach eksploatacyjnych.

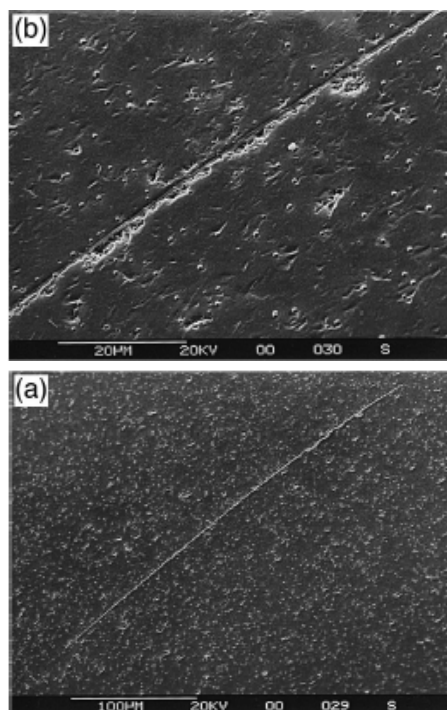
Inicjacja pęknięć może występować w wyniku defektu struktury (powierzchniowe lub podpowierzchniowe wtrącenia, pęknięcia, pory) lub w wyniku kruchego pęknięcia. Wady powierzchniowe występujące w materiałach ceramicznych można podzielić na cztery grupy:

- porowatość;
- wtrącenia powierzchniowe;
- pęknięcia powierzchniowe w wyniku procesu spiekania;
- defekty struktury.

Na rysunku 1 przedstawiono wadę powierzchniową (porowatość) występującą na kulce z dwutlenku cyrkonu ( $ZrO_2$ -MgO) (Karaszewski, 2007). Kolejny rysunek 2 przedstawia pęknięcie kulki ceramicznej ( $Si_3N_4$ ) powstałe w wyniku procesu spiekania (Wang i Hadfield, 1999).



Rys. 1. Powierzchnia kulki ceramicznej  $ZrO_2$ (MgO) z widoczną wadą powierzchniową (Karaszewski, 2007)



Rys. 2. Wada materiałowa powstała w wyniku procesu spiekania na kulce z azotku krzemu  $Si_3N_4$  (Wang i Hadfield, 1999)

Oczywistym jest, że wszelkiego rodzaju wady materiałowe znacznie zmniejszają wytrzymałość zmęczeniową. Obecnie rozprzestrzenianie się istniejących pęknięć (wad) w materiałach ceramicznych jest uważane za główny wewnętrzny mechanizm zmęczenia, który powoduje zniszczenie zależne od liczby cykli. W celu umożliwienia szerokiego zastosowania materiałów ceramicznych niezbędna jest zatem umiejętność określenia wytrzymałości zmęczeniowej tych materiałów.

## 2. METODYKA BADAŃ

Do badań wytypowano dwutlenek cyrkonu stabilizowany tlenkiem magnezu w postaci kulek o średnicy  $\frac{1}{2}$ ' (tabela 1). Dwutlenek cyrkonu obok azotku krzemu i tlenku aluminium jest jednym z najczęściej obecnie stosowanym materiałem ceramicznym na elementy maszyn. Badania prowadzono przy smarowaniu olejem (tabela 2) w układzie cztero-kulowym (przy prędkości obrotowej 1500 obr/min i przy obciążeniu 1000N odpowiadającemu naciskom kontaktowym 6,2GPa), z którego górna kulka miała wprowadzone sztuczne pęknięcie w miejscu styku z kulkami dolnymi, które były bez wad.

Koliste wady powierzchniowe, wykonano metodą polegającą na przyłożeniu obciążenia udarowego do kulki z dwutlenku cyrkonu w celu wytworzenia stosunkowo płytkich pęknięć kolistych zwanych inaczej Hertzowskimi. Wykonano pięć rodzajów pęknięć o różnych wielkościach oznaczonych K1, K2, K3, K4, K5 (w kolejności od najmniejszego do największego) spuszczać stalowy pręt o masie 400g z wysokości odpowiednio 150mm, 200mm, 300mm, 500mm i 750mm.

Dokładny opis sposobu wykonania tych pęknięć oraz charakterystykę stanowiska badawczego przedstawiono w pracy Karaszewski (2007).

**Tab. 1.** Właściwości dwutlenku cyrkonu  $ZrO_2(MgO)$

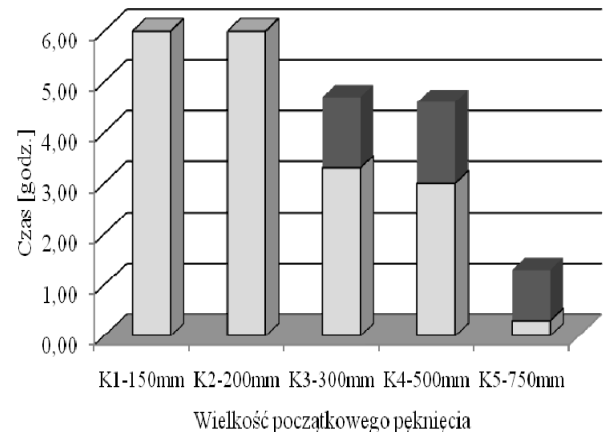
Skład chemiczny:	10molMgO+ZrO <sub>2</sub>
Wytrzymałość na ściskanie [MPa]	1900
Maksymalna użyteczna temperatura [°C]	1100
Moduł Younga [GPa]	200
Twardość HV	1020
Gęstość [g/cm <sup>3</sup> ]	5,73
Odporność na kruche pękanie [MPa*m <sup>1/2</sup> ]	10

**Tab. 2.** Charakterystyka oleju badawczego

Nazwa handlowa	T-9
Producent	Nynas
<u>Właściwości:</u>	
Lepkość kinematyczna w temp. 40°C [mm <sup>2</sup> /s]	9,13
Zawartość siarki [%]	0,01
Zawartość węglowodorów aromatycznych [%]	9,0

## 3. BADANIA DOŚWIADCZALNE I ANALIZA WYNIKÓW

Na rysunku 3 przedstawiono wykres czasu trwania testów dla różnych wielkości pęknięć kolistych. Test kończono w momencie pojawiających się silnych drgań akustycznych (świadczących o zniszczeniu powierzchni kulki ceramicznej) lub trwał zaplanowaną długość 21600 sekund (6 godzin). Każdy test powtarzano czterokrotnie.



**Rys. 3.** Maksymalny i minimalny czas trwania testu dla sztucznie wprowadzonych pęknięć kolistych na kulkach z  $ZrO_2(MgO)$

Z przeprowadzonych testów wynika, że graniczną wartością wielkości początkowego pęknięcia, przy którym nie następuje gwałtowne niszczenie powierzchni jest wielkość K2. Dla większych wprowadzonych pęknięć kolistych (K3 i K4) występowało niszczenie powierzchni po około 3 godzinach czasu trwania testu, co odpowiada ponad 810 tysiącom cykli obciążenia. W przypadku największego wykonanego pęknięcia (K5), już po kilkunastu minutach czasu trwania testu następowało niszczenie powierzchni kulki ceramicznej. Do analizy czasu trwania testu wybrano tylko te kulki, w których na powierzchni nie wystąpiły wady powierzchniowe inne od kolistych (Karaszewski, 2007).

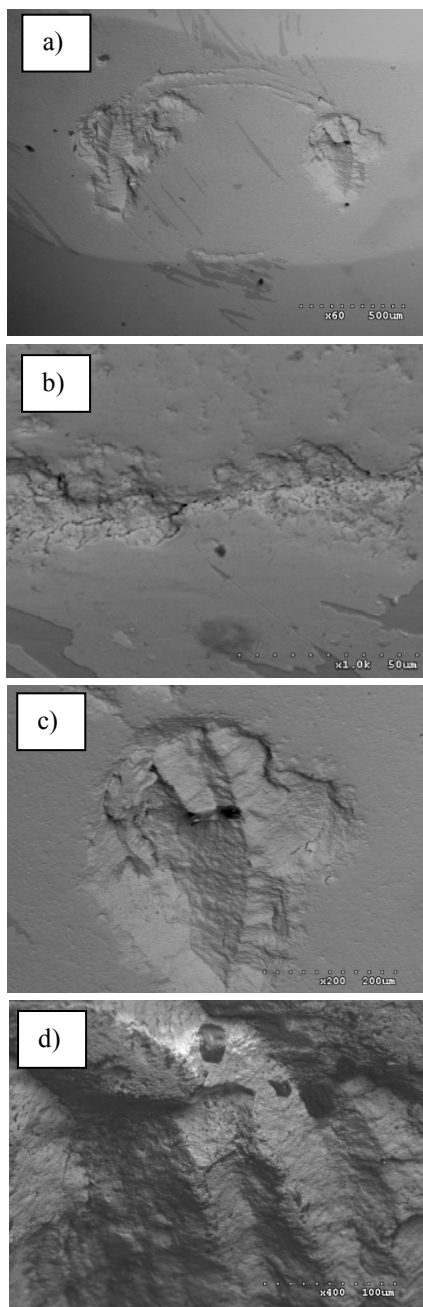
Na podstawie przeprowadzonych testów i analizy mikroskopowej powierzchni kulek z  $ZrO_2(MgO)$  można dokładnie określić mechanizm rozprzestrzeniania się pęknięć w dwutlenku cyrkonu od początkowego pęknięcia do całkowitego zniszczenia powierzchni ceramicznej. W wyniku obciążeń zmiennych działających na powierzchnię kulki ceramicznej istniejące pęknięcia rozprzestrzenia się, w wyniku czego następuje niszczenie powierzchni kulki ceramicznej (obraz powierzchni kulki przedstawiono na rysunku 4). Sztucznie wprowadzone pęknięcie rozchodzi się z powierzchni kulki ceramicznej pionowo lub promieniowo, a następnie rozprzestrzenia się stożkowo. Pęknięcie po stożku rozprzestrzenia się zgodnie z kierunkiem minimalnych naprężeń głównych (Karaszewski, 2006; Hadfield i inni, 1993c; Karaszewski, 2008). Rozprzestrzenianie się pęknięcia w kulce ceramicznej można podzielić na trzy etapy.

Etap I charakteryzuje się wykruszaniem się powierzchni ceramicznej w obrębie styku początkowego pęknięcia z powierzchnią kulki ceramicznej (rysunek 4b).

Etap II charakteryzuje się dalszą podpowierzchniową propagacją pęknięcia w kierunku powierzchni (rysunek 4c), przy czym propagacja ta ma miejsce z powierzchni stożkowej początkowego pęknięcia również w postaci pęknięć kolistych. Po dotarciu pęknięcia do powierzchni następuje wyrywanie cząstek materiału z powierzchni kulki ceramicznej.

Etap III charakteryzuje się dużym ubytkiem materiału. Niszczenie powierzchni charakterystyczne dla tego etapu powoduje powstanie wielokrotnego układu „V” pęknięcia (rysunek 4d). Pęknięcia te rozprzestrzeniają się zgodnie z pojawiającymi się wtórnymi pęknięciami kolistymi.

#### 4. PODSUMOWANIE



Rys. 4. Obraz powierzchni kulki  $ZrO_2(MgO)$  (a) z I (b), II (c) i III (d) etapem propagacji pęknięcia kolistego

Przeprowadzono obszerne badania doświadczalne rozprzestrzeniania się pęknięć kolistych wykonanych na kulkach z dwutlenku cyrkonu  $ZrO_2(MgO)$ .

Na podstawie badań doświadczalnych:

- określono wielkość pęknięć, które mogą być tolerowane w dwutlenku cyrkonu  $ZrO_2(MgO)$  przy określonych obciążeniach zmiennych przy smarowaniu olejem;
- określono wielkość dopuszczalnego pęknięcia, które może być tolerowane przy określonym obciążeniu;
- określono formę zniszczenia kulek ceramicznych w przypadku pęknięć kolistych oraz opisano mechanizm niszczenia kulki ceramicznej w wyniku rozprzestrzeniania się pęknięć podpowierzchniowych.

#### LITERATURA

1. **Hadfield M., Fujinawa G., Stolarski T. A., Tobe S.** (1993a), Residual stress in failed rolling contact ceramic balls, *Ceramics International*, Vol. 19, No.5, 307-313.
2. **Hadfield M., Stolarski T. A. and Cundill R. T.** (1993b), Delamination of ceramic balls in rolling contact, *Ceramics International*, Vol. 19, 151-158
3. **Hadfield M., Stolarski T. A. and Cundill R. T., Horton S.** (1993c), Failure modes of ceramic elements with ring-crack defects, *Tribology International*, Vol. 26, nr 3, 157-164.
4. **Hadfield M., Stolarski T. A., Cundill R. T.** (1993d), Failure modes of ceramics in rolling contact, *Proc. of the Royal Society*, A443, 607-621.
5. **Karaszewski W.** (2006), The influence of oil additives on spread cracks in silicone nitride, *The 12th Nordic Symposium on Tribology*, June 7-9, Helsingor, Dania.
6. **Karaszewski W.** (2007), Powierzchniowa wytrzymałość zmęczeniowa materiałów ceramicznych o niedoskonałej strukturze wewnętrznej, *Sprawozdanie z prac zrealizowanych w ramach projektu badawczego MNiSW*, nr 4 T07C 035 28, Politechnika Gdańska.
7. **Karaszewski W.** (2008), The influence of oil additives on spread cracks in silicone nitride, *Tribology International*, Vol. 41, issue 9-10, 889-895
8. **Wang Y., Hadfield M.** (1999), Rolling contact fatigue failure modes of lubricated silicon nitride in relation to ring crack defects, *Wear*, Vol. 225-229, 1284-1292.

#### SURFACE CRACKS OF CERAMIC ROLLING ELEMENTS

**Abstract:** Zirconia is one of the most important ceramic materials for bearing applications (high speeds, different environments). The main problems connected with fatigue life are ring crack defects as the effect of manufacture or defects due to material structure. These defects decrease the rolling contact fatigue considerably. An experimental study of ring cracks propagation of zirconia  $ZrO_2(MgO)$  was described in the paper. The rolling contact tests were performed on pre-cracks zirconia upper ball using a modified (rolling lower balls) four-ball machine in specified lubricant. Ball surfaces and failures were examined using scanning electron microscopy.

Pracę wykonano w ramach realizacji projektu badawczego nr N 504 405935 finansowanego ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego.