

Waldemar KARASZEWSKI*

OGRANICZENIE TRWAŁOŚCI SKOJARZEŃ CERAMICZNYCH W WYNIKU PROPAGACJI PĘKNIĘĆ POWIERZCHNIOWYCH

FATIGUE LIFE LIMITATION OF CERAMIC MATERIALS DUE TO SURFACE CRACK PROPAGATION

Słowa kluczowe:

materiały ceramiczne, trwałość zmęczeniowa, pęknięcia powierzchniowe

Key-words:

ceramic materials, fatigue life, surface defects

Streszczenie

Materiały ceramiczne od kilkunastu lat znajdują coraz większe zastosowanie w technice. Wynika to z charakterystycznych właściwości materiałów ceramicznych, takich jak: duża twardość, odporność na korozję, możliwość stosowania w środowiskach agresywnie chemicznych, a także z uwagi na mniejszy ciężar właściwy w porównaniu z materiałami stalowymi. Przykładem zastosowań tej grupy materiałowej mogą być: powłoki ceramiczne nakładane na powierzchnie cylindrów silników samocho-

* Politechnika Gdańska, Wydział Mechaniczny, ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, tel.: (58) 3471937, tel. kom.: 600325690, e-mail: w.karaszewski@wp.pl

dowych, elementy pomp drukarskich, elementy zaworów kulowych itp. Materiały ceramiczne znajdują także zastosowanie w inżynierii łożyskowania, czego dowodem są między innymi hybrydowe łożyska toczne.

Jednak zastosowanie materiałów ceramicznych wiąże się z wieloma ograniczeniami. Podstawową ich wadą jest mała odporność na kruche pękanie, która wiąże się z ich strukturą chemiczną i właściwościami mechanicznymi. Drogą do szerokiego zastosowania tego typu materiałów jest znajomość mechanizmów propagacji pęknięć i momentu ich inicjacji w określonych warunkach pracy.

W niniejszym artykule przedstawiona została krótka analiza literaturowa dotycząca mechanizmów propagacji pęknięć w materiałach ceramicznych oraz wyniki dotychczasowych badań doświadczalnych wybranych materiałów ceramicznych z uwzględnieniem wpływu pęknięć powierzchniowych na trwałość ceramicznych skojarzeń tocznych.

WPROWADZENIE

Proces niszczenia zmęczeniowego w materiałach ceramicznych uważany jest za bardzo skomplikowany, z uwagi na wiele problemów: występowanie różnego rodzaju wad (porowatość, wtrącenia, wady technologiczne), znaczący wpływ środowiska, mikrostruktury i dodatków w procesie wytwarzania. Wszelkiego rodzaju wady materiałowe są źródłem propagacji pęknięć, które znacznie zmniejszają trwałość zmęczeniową. Zrozumienie zjawisk będących wynikiem procesu zmęczenia tej grupy materiałowej jest kluczowe dla szerszego zastosowania tych materiałów w technice.

Zmęczeniowe pękanie materiałów można podzielić na dwa procesy: proces nukleacji (tworzenia) pęknięcia i następujący po nim proces wzrostu pęknięcia. W literaturze polskiej można spotkać wiele pozycji dotyczących mechaniki pęknięcia, przy czym znakomita większość zawiera zjawiska zachodzące w metalach i ich stopach. Do najbardziej znanych pozycji należą [L. 1, 2, 3].

Materiały ceramiczne, oprócz wielu korzystnych właściwości, mają jedną podstawową wadę – są kruche. W związku z tym wszelkiego rodzaju wady i pęknięcia materiałowe rozprzestrzeniają się pod wpływem przyłożonych obciążeń zmiennych znacznie szybciej niż w przypadku materiałów bardziej elastycznych. Zjawisko to powoduje znaczne ograni-



czenie trwałości skojarzeń ceramicznych, uniemożliwiając w wielu wypadkach zastosowanie ich w technice.

MECHANIZMY PROPAGACJI PĘKNIĘĆ

Rozprzestrzenianie się pęknięć jest ściśle związane z zależnością naprężeń w funkcji odkształcenia. W przypadku materiałów ceramicznych wartość odkształcenia przy określonym obciążeniu jest znacznie mniejsza niż w przypadku materiałów ciągliwych [L. 2]. Dodatkowo nie występuje okres płynięcia materiału charakterystyczny dla metali. Powoduje to, że po przekroczeniu określonego obciążenia następuje gwałtowne niszczenie materiału.

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 (wytwarzania) i defekty struktury.

Propagacja krytyczna i podkrytyczna pęknięcia może być rozważana, jako wynik wzajemnych zależności pomiędzy dwoma rodzajami mechanizmów: wewnętrznego i zewnętrznego [L. 1]. Rozwojowi pęknięcia sprzyjają wewnętrzne mikrostrukturalne mechanizmy zniszczenia mające miejsce przed wierzchołkiem pęknięcia. Zahamowaniu pęknięcia sprzyjają natomiast mechanizmy zewnętrzne, które głównie oddziałują za wierzchołkiem pęknięcia i powodują zamykanie (domykanie) pęknięć zmęczeniowych. Domykanie pęknięć zmęczeniowych jest zjawiskiem powodującym „zasłanianie” wierzchołka pęknięcia od pola działających sił [L. 3, 5].

Wewnętrzne mechanizmy niszczenia powodują najczęściej powstawanie mikropęknięć lub wolnych przestrzeni międzyfazowych (w wyniku dyslokacji lub dekohezji międzyfazowej) w obszarze największych naprężeń przed wierzchołkiem pęknięcia prowadzących do klasycznego zniszczenia przez rozszczepienie lub pęknięcie międzykrystaliczne. Porównywalne mechanizmy przy obciążeniu cyklicznym powodują powtarzalne stępanie i wyostrzenie wierzchołka pęknięcia.

Zewnętrzne mechanizmy ochronne, będące rezultatem tworzenia nieelastycznych obszarów otaczających „trójkąt” pęknięcia lub będące wy-

nikami fizycznego styku pomiędzy powierzchniami pęknięcia powodują natomiast zahamowanie propagacji pęknięć [L. 5].

W celu określenia wpływu wad materiałowych na trwałość wytypowanych skojarzeń ceramicznych postanowiono przeprowadzić badania doświadczalne.

METODYKA BADAŃ

Do badań wytypowano dwa materiały ceramiczne: dwutlenek cyrkonu stabilizowany tlenkiem magnezu $ZrO_2(MgO)$ oraz azotek krzemu Si_3N_4 . Właściwości materiałów ceramicznych w postaci kulek o średnicy $\frac{1}{2}$ ' przedstawiono w **Tab. 1**. Wytypowane materiały są jednymi z najczęściej obecnie stosowanych materiałów ceramicznych na elementy maszyn. Badania prowadzono przy smarowaniu olejem (**Tab. 2**) w układzie czterokulowym (przy prędkości obrotowej 1500 obr./min i przy obciążeniu 1000 N odpowiadającemu naciskom kontaktowym 6,2 GPa). Do badań przyjęto pęknięcia koliste, które najczęściej są spotykane w materiałach ceramicznych [L. 6, 7]. Pęknięcia wykonano na kulce górnej w miejscu styku tej kulki z kulkami dolnymi. Dla porównania wykonano także badania doświadczalne z kulkami bez wprowadzonych sztucznie pęknięć.

Tabela 1. Właściwości dwutlenku cyrkonu $ZrO_2(MgO)$ i azotku krzemu Si_3N_4

Table 1. Properties of zirconia $ZrO_2(MgO)$ and silicon nitride Si_3N_4 ceramic materials

Skład chemiczny:	10molMgO+ ZrO_2	99,9 % Si_3N_4
Wytrzymałość na ściskanie [MPa]	1900	2353
Moduł Younga [GPa]	200	324
Twardość HV	1020	1700 HV
Gęstość [g/cm^3]	5,73	3,2

Tabela 2. Charakterystyka oleju badawczego

Table 2. Properties of used lubricant

Nazwa handlowa (producent)	T-9 (Nynas)
Lepkość kinematyczna w temp. 40 ⁰ C [mm^2/s]	9,13
Zawartość siarki [%]	0,01
Zawartość węglowodorów aromatycznych [%]	9,0

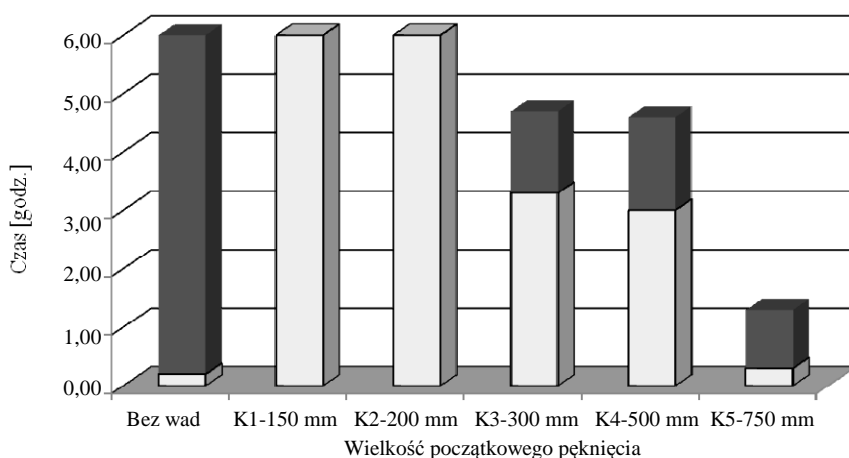
Koliste wady powierzchniowe wykonano metodą polegającą na przyłożeniu obciążenia udarowego do kulki ceramicznej w celu wytworzenia stosunkowo płytkich pęknięć kolistych, zwanych inaczej hertzowskimi.

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 150 mm, 200 mm, 300 mm, 500 mm i 750 mm. Dokładny opis sposobu wykonania tych pęknięć oraz charakterystykę stanowiska badawczego przedstawiono w pracach [L. 8, 9].

BADANIA DOŚWIADCZALNE I ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

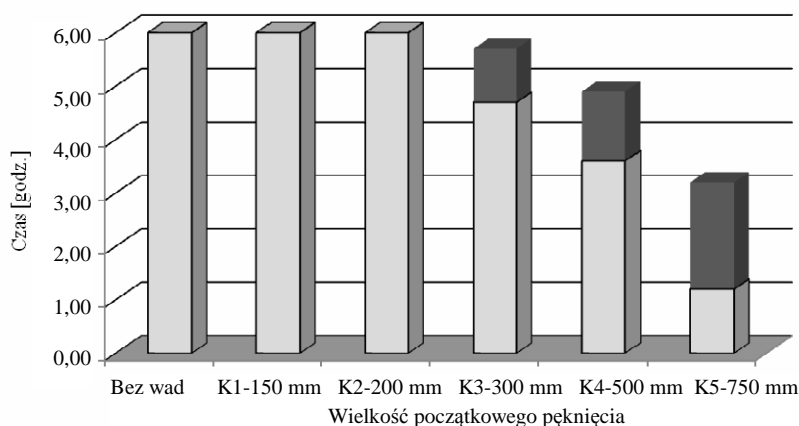
Na **Rysunkach 1 i 2** przedstawiono minimalne i maksymalne wartości czasu trwania testów na kulkach z dwutlenku cyrkonu i azotku krzemu. Testy kończono w momencie wyraźnie większych drgań pojawiających się w czasie testu, które były wywoływane w wyniku zniszczenia powierzchni kulek ceramicznych.

Analizując **Rys. 1**, należy zwrócić uwagę na duży rozrzut wyników badań (duża różnica czasów trwania testów) na kulkach z $ZrO_2(MgO)$ bez wprowadzonych sztucznie pęknięć. Ta różnica wynika z podpowierzchniowych wad dwutlenku cyrkonu w postaci porów, których propagacja powoduje znaczne zniszczenia powierzchni badanych kulek. Do analizy kulek z pęknięciami kolistymi brano pod uwagę tylko te kulki, na powierzchni których nie znaleziono wad w postaci porów, aby w analizie uwzględnić tylko jeden rodzaj pęknięć.



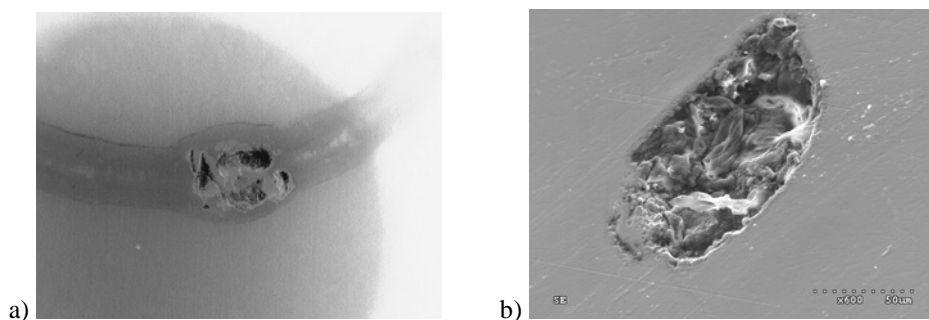
Rys. 1. Maksymalny i minimalny czas trwania testu dla sztucznie wprowadzonych pęknięć kolistych na kulkach z $ZrO_2(MgO)$

Fig. 1. Variation of test time for zirconia balls with ring cracks defects



Rys. 2. Maksymalny i minimalny czas trwania testu dla sztucznie wprowadzonych pęknięć kolistych na kulkach z Si_3N_4

Fig. 2. Variation of test time for silicon nitride balls with ring cracks defects



Rys. 3. Widok wad podpowierzchniowych w postaci porów na kulkach z $\text{ZrO}_2(\text{MgO})$

Fig. 3. Zirconia surface ball observation with pores defects

Wad w postaci podpowierzchniowych porów nie stwierdzono na kulkach z azotku krzemu, dlatego wszystkie testy dla kulek bez wad trwały zaplanowany czas (**Rys. 2**).

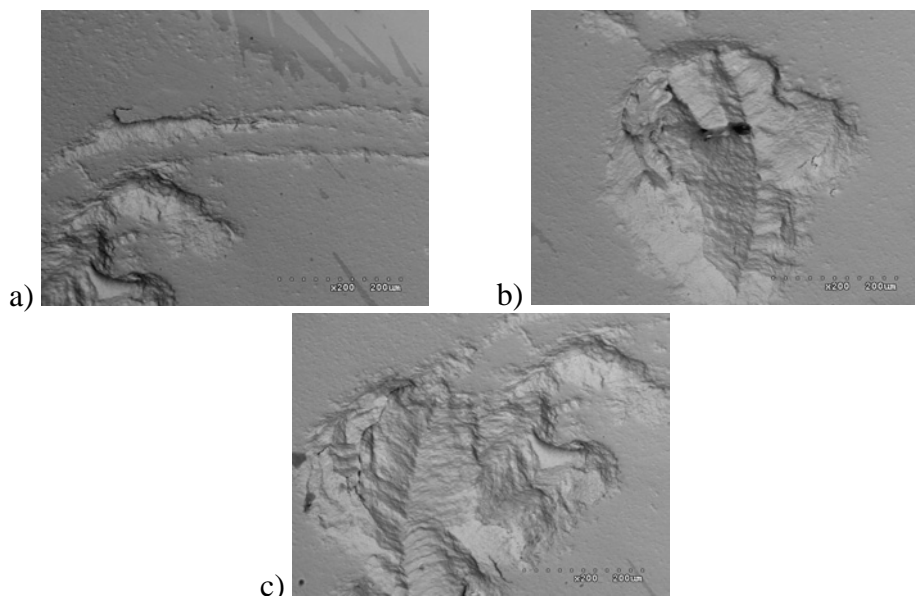
Na **Rys. 3a i 3b** przedstawiono przykłady zdjęć pokazujących ujawnione wady podpowierzchniowe w postaci porów na kulkach z dwutlenku cyrkonu.

Na podstawie przeprowadzonych testów i analizy mikroskopowej powierzchni kulek z $ZrO_2(MgO)$ można opisać mechanizm rozprzestrzeniania się pęknięć kolistych w dwutlenku cyrkonu od początkowego pęknięcia do całkowitego zniszczenia powierzchni ceramicznej. W wyniku obciążeń zmiennych działających na powierzchnię kulki ceramicznej istniejące pęknięcie rozprzestrzenia się, w wyniku czego następuje niszczenie powierzchni kulki ceramicznej. Sztucznie wprowadzone pęknięcie rozchodzi się z powierzchni kulki ceramicznej pionowo lub promieniowo [L. 6, 7], a następnie rozprzestrzenia się stożkowo, zgodnie z kierunkiem minimalnych naprężeń głównych [L. 6, 8, 9]. 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 (**Rys. 4a**).
- etap II charakteryzuje się dalszą podpowierzchniową propagacją pęknięcia w kierunku powierzchni (**Rys. 4b**), 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 (**Rys. 4c**). Pęknięcia te rozprzestrzeniają się zgodnie z pojawiającymi się wtórnymi pęknięciami kolistymi.

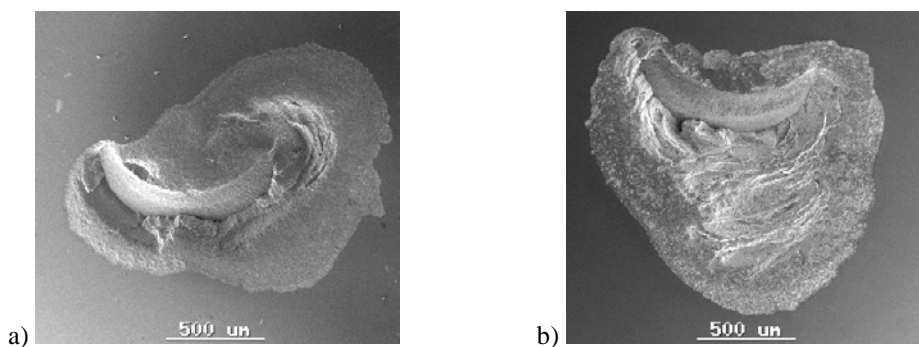
Na kolejnym rysunku (**Rys. 5**) przedstawiono powierzchnię kulki z azotku krzemu po testach z wcześniej wykonanym pęknięciem kolistym. Podobnie jak w przypadku kulek z dwutlenku cyrkonu rozprzestrzenianie się pęknięć można również podzielić na trzy etapy. Pierwsze dwa etapy propagacji są identyczne jak dla kulek z dwutlenku cyrkonu. Różnica pojawia się w momencie pojawienia się w pełni rozwiniętego pęknięcia (**Rys. 5a**), które dla azotku krzemu charakteryzuje się gładką, stożkową powierzchnią powstałą w wyniku kruchego pęknięcia z początkowego pęknięcia głównego.

Charakterystyczne również jest to, że po pojawieniu się w pełni rozwiniętego pęknięcia w azotku krzemu następuje dalsza propagacja pęknięć ze zniszczonej powierzchni, które można nazwać pęknięciami wtórnymi. Zjawisko to widoczne jest na **Rys. 5b**. Dokładną analizę propagacji pęknięć kolistych w azotku krzemu przedstawiono w pracach [L. 8, 9].



Rys. 4. Etapy I (a), II, (b), III (c) propagacji pęknięć kolistych na kulkach z $ZrO_2(MgO)$

Fig. 4. Zirconia surface ball observation of stages of ring crack propagation



Rys. 5. Etap III (a) i wtórna propagacja (b) pęknięć kolistych na kulkach z Si_3N_4

Fig. 5. Silicon nitride surface ball observation of stages of ring crack propagation

PODSUMOWANIE

Na podstawie przeprowadzonych badań doświadczalnych można wysunąć następujące wnioski:

- trwałość zmęczeniowa dwutlenku cyrkonu $ZrO_2(MgO)$ jest znacznie ograniczona w wyniku występowania wad materiałowych w postaci porów,



- trwałość zmęczeniowa azotku krzemu z wprowadzonymi sztucznie pęknięciami kolistymi jest wyższa od trwałości zmęczeniowej dwutlenku cyrkonu (**Rys. 1, Rys. 2**),
- proces propagacji pęknięć kolistych dla obu badanych materiałów różni się w końcowym etapie propagacji w momencie pojawienia się w pełni rozwiniętego pęknięcia.

Pracę wykonano w ramach realizacji projektów badawczych nr 8T07C 039 21 i N504 405935 finansowanych ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

LITERATURA

1. Kocańda S.: Zmęczeniowe pękanie metali. Warszawa, WNT 1985.
2. Kocańda S., Szala J.: Podstawy obliczeń zmęczeniowych. Warszawa, PWN 1997.
3. Neimitz A.: Mechanika pękania. Warszawa, PWN 1998.
4. Ritchie R.O.: Mechanisms of fatigue-crack propagation in ductile and brittle solids. *International Journal of Fracture*. 1999, 100, s. 55–83.
5. Ritchie R.O.: Mechanisms of fatigue crack propagation in metals, ceramics and composites: Role of crack-tip shielding. *Materials Science and Engineering*. 1988, A103, s. 15–28.
6. Wang Y., Hadfield M.: Rolling contact fatigue failure modes of lubricated silicon nitride in relation to ring crack defects, *Wear* 225–229 (1999) 1284–1292.
7. Hadfield M., Fujinawa G., Stolarski T.A., Tobe S.: Residual stress in failed rolling contact ceramic balls, *Ceramics International*, vol. 19, No. 5, pp. 307–313, 1993.
8. Karaszewski W.: 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 2007.
9. Karaszewski W.: The influence of oil additives on spread cracks in silicone nitride, *Tribology International*, vol. 41, issue 9–10, 889–895, 2008.

Recenzent:
Witold PIEKOSZEWSKI



Summary

Some ceramic materials have been found to have the optimum combination of properties that are suitable for rolling element bearing applications (high speeds, high loads, different environments). Cracks, structure defects and manufacturing faults are the main problem connected with fatigue life. These defects decrease the rolling contact fatigue considerably. An experimental study of ring cracks propagation and structure defects propagation of zirconia and silicon nitride was also described in the paper. The rolling contact tests were performed on pre-cracked zirconia and silicon nitride upper balls using a modified (rolling lower balls) four-ball machine in specified lubricant. Ball surfaces and failures were examined using scanning electron microscopy. The paper contains the following:

- ⇒ The variation of test time for both ceramic materials balls with ring cracks defects was presented.
- ⇒ The mechanism of ring crack propagation in zirconia and silicon nitride was described.
- ⇒ The influence of pores on fatigue life of zirconia was described.