

Waldemar KARASZEWSKI*

ANALIZA NAPRĘŻEŃ W CERAMICZNYCH ELEMENTACH TOCZNYCH

STRESS ANALYSIS IN CERAMIC ROLLING ELEMENTS

Słowa kluczowe:

materiały ceramiczne, trwałość zmęczeniowa, pęknięcia powierzchniowe, analiza MES

Key-words:

Ceramic materials, Fatigue life, Surface defects, finite element analysis

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 samochodowych, elementy pomp drukarskich, elementy zaworów kulowych itp.

* Politechnika Gdańska, Wydział Mechaniczny, ul. G. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, e-mail: w.karaszewski@wp.pl.

Materiały ceramiczne znajdują także zastosowanie w inżynierii łożyskowania, czego dowodem są między innymi hybrydowe łożyska toczne.

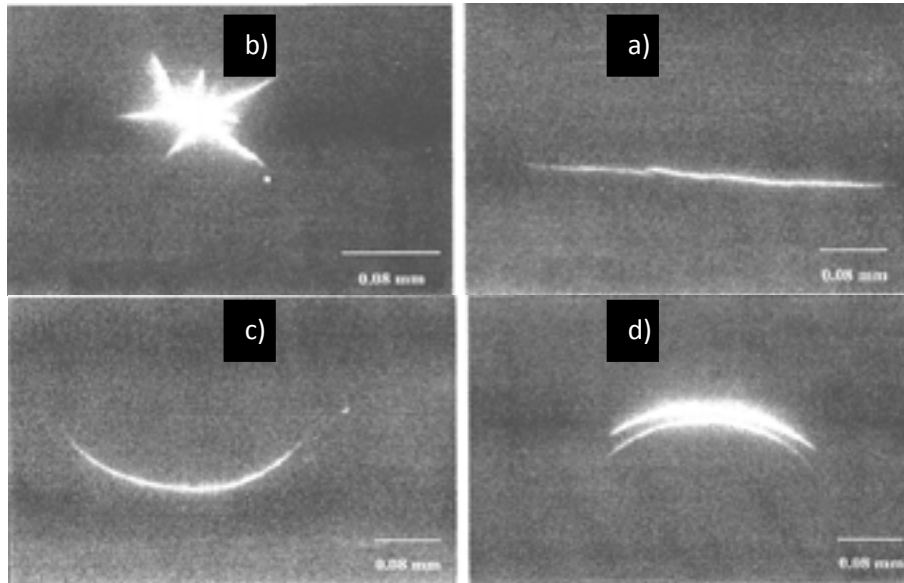
Jednak zastosowanie materiałów ceramicznych wiąże się z wieloma ograniczeniami. Podstawową ich wadą jest mała odporność na kruche pękanie, która wiąże się z ich strukturą chemiczną i właściwościami mechanicznymi. Drogą do szerokiego zastosowania tego typu materiałów jest znajomość mechanizmów propagacji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

W pracy przeprowadzono metodą elementów skończonych (MES) analizę stanu naprężenia w strefie pęknięcia kolistego kulki ceramicznej wykonanej z azotku krzemu poddanej naciskom hertzowskim. Naprężenia analizowano dla pęknięć, które najczęściej są spotykane na powierzchni kulek ceramicznych. Obliczenia numeryczne prowadzono za pomocą programu ANSYS. Rozwiązania numeryczne porównywano z wynikami badań doświadczalnych propagacji tego typu pęknięć.

WPROWADZENIE

Materiały ceramiczne coraz częściej są stosowane na elementy toczne łożysk kulkowych. Obecnie dostępne są zarówno łożyska hybrydowe, jak i łożyska wykonane w całości z materiałów ceramicznych. Elementy toczne nie tylko wykonywane są z azotku krzemu, ale coraz większą popularność zdobywa dwutlenek cyrkonu z odpowiednimi dodatkami technologicznymi. Podstawowym problemem związanym z zastosowaniem materiałów ceramicznych na elementy toczne łożysk kulkowych są różnego rodzaju wady spotykane na ich powierzchni. Na **Rys. 1** pokazano typowe wady spotykane w azotku krzemu. Dzięki rygorystycznej kontroli produkcji tego typu elementów możliwe jest uzyskanie materiałów bez wad, ale wiąże się to z bardzo wysokimi kosztami. Dodatkowo, szczególnie w przypadku układów łożyskowych, istnieje niebezpieczeństwo wystąpienia podczas eksploatacji obciążeń udarowych, w wyniku których mogą pojawić się typowe pęknięcia hertzowskie (koliste) na elementach tocznych.

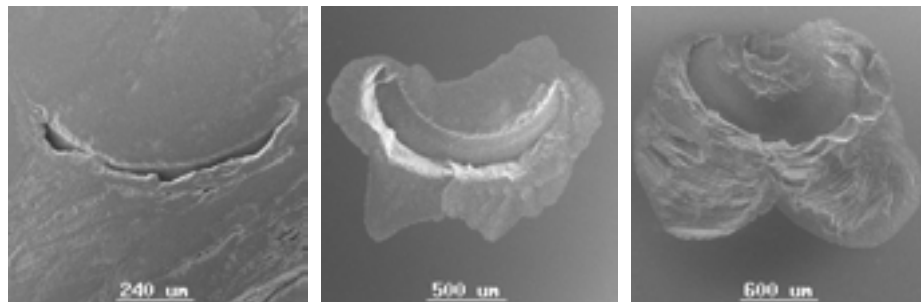
W wielu wcześniejszych publikacjach [**L. 2–14**] prezentowano prace dotyczące badań doświadczalnych propagacji pęknięć materiałów ceramicznych w styku tocznym. Na podstawie tych badań można było stwierdzić graniczne wielkości pęknięć, przy których następowała ich propagacja przy określonych obciążeniach. Badania doświadczalne wykazały także, iż najbardziej niebezpiecznym miejscem pęknięcia nie jest jego



Rys. 1. Typowe wady spotykane na powierzchni kulek ceramicznych: a) pęknięcie gwiazdźdźiste, b) pęknięcie powstałe w wyniku procesu spiekania, c) pojedyncze pęknięcie koliste, d) wielokrotne pęknięcie koliste [L. 1]

Fig. 1. Typical crack defects found on ceramic balls under UV light: a) star defect, b) pressing defect, c) single ring crack, d) concentric ring crack [L. 1]

wierzchołek, ale pęknięcia bezpośrednio pod powierzchnią kulki ceramicznej [L. 13–15]. Na **Rys. 2** pokazano przykładowe zdjęcia powierzchni kulki ceramicznej wykonanej z azotku krzemu, na których widoczne są etapy propagacji pęknięcia kolistego. Dokładny opis badań doświadczalnych przedstawiono w pracach [L. 11, 13].



Rys. 2. Etapy propagacji pęknięcia kolistego w azotku krzemu [L. 11, 13, 14]

Fig. 2. Stages of ring crack propagation in silicon nitride [L. 12, 13, 14]

Jako dalszy etap prac związanych z propagacją pęknięć w materiałach ceramicznych postanowiono zamodelować pęknięcie koliste o kształcie zbliżonym do sztucznie wprowadzonego pęknięcia początkowego stosowanego w badaniach doświadczalnych, a następnie wykonać analizę stanu naprężeń w strefie tego pęknięcia metodą elementów skończonych (MES).

Celem analizy naprężeń w otoczeniu pęknięcia przy różnym położeniu pęknięcia w stosunku do miejsca styku (przyłożenia obciążenia) jest określenie rozkładu naprężeń, a w konsekwencji poznanie mechanizmów propagacji pęknięć ze szczególnym uwzględnieniem inicjacji pęknięć wtórnych. Ma to szczególne znaczenie dla problematyki ceramicznych łożysk tocznych, gdyż miejsce i moment inicjacji pęknięć wtórnych decyduje o trwałości tego typu skojarzeń. Analiza naprężeń dla różnych położenia pęknięć w stosunku do miejsca styku odzwierciedla rzeczywiste warunki pracy łożysk tocznych, gdzie na elementy toczne działają zmienne obciążenia w wyniku zmian punktu styku elementów tocznych.

MODEL PĘKNIĘCIA

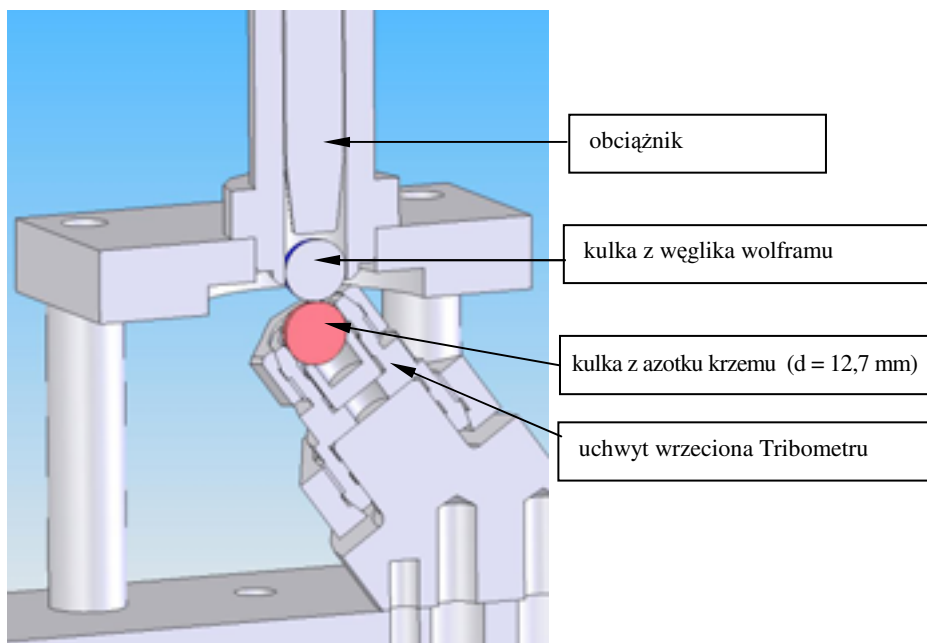
Pęknięcia zamodelowano na podstawie wykonanych zdjęć mikroskopowych sztucznie wprowadzonych pęknięć. Miało to na celu bezpośrednie porównanie wyników badań doświadczalnych z analizą MES.

Pęknięcia wykonywano metodą udarową poprzez spuszczenie obciążnika o określonej masie (400 g) z wysokości 500 mm. Na **Rys. 3** przedstawiono schemat przyrządu do wykonywania pęknięć. Uderzenie obciążnika, poprzez kulkę z węgla wolframu, powoduje powstanie pęknięcia hertzowskiego (kolistego) na kulce z azotku krzemu. Użycie kulki z węgla wolframu minimalizuje odkształcenia plastyczne podczas uderzenia. Model pęknięcia zdefiniowany na **Rys. 4** powstał na podstawie zdjęć mikroskopowych powierzchni (**Rys. 5a**) i przekroju poprzecznego (**Rys. 5b**) kulki ze sztucznie wprowadzonym pęknięciem.

ANALIZA NAPRĘŻEŃ W STREFIE PĘKNIĘCIA

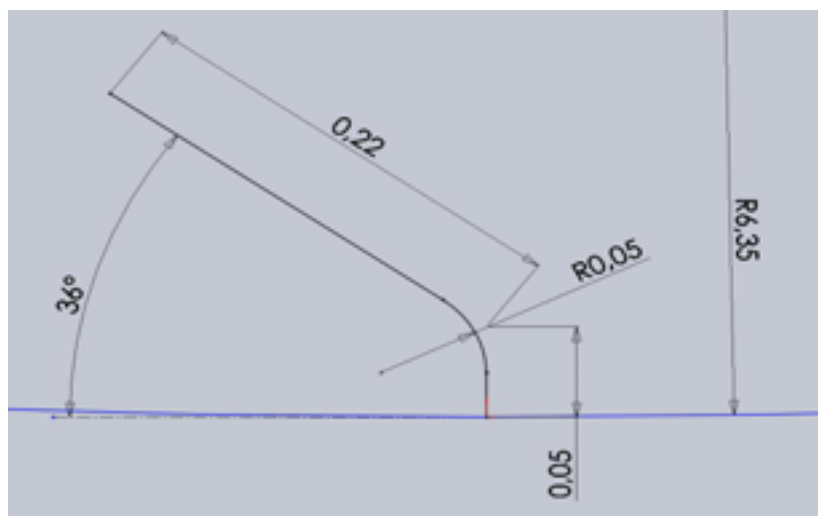
Badania doświadczalne prowadzono w układzie czterokulowym [L. 11, 13–15], zatem jako model obciążenia przyjęto styk dwóch kulek poddanych identycznym naciskom kontaktowym. Położenie pęknięcia definio-





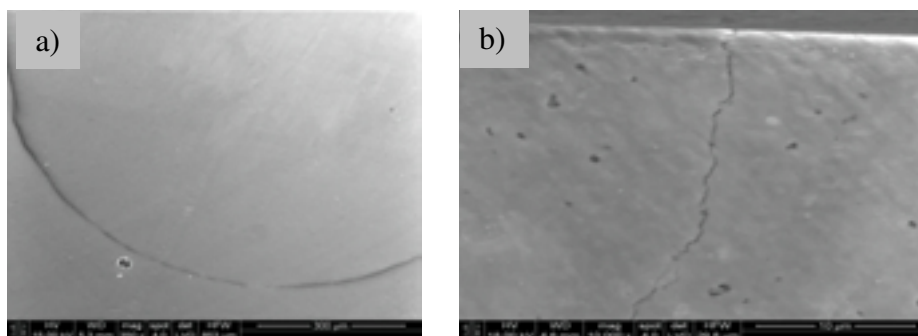
Rys. 3. Urządzenie do wykonywania pęknięć na kulkach ceramicznych

Fig. 3. Rinck crack device maker



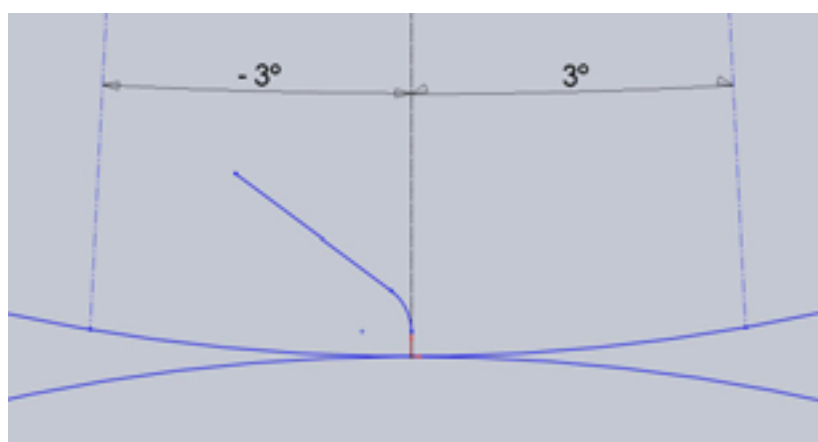
Rys. 4. Geometria (model) pęknięcia hertzowskiego

Fig. 4. Geometry of hertzian crack



Rys. 5. Obraz powierzchni (a) i przekroju (b) kulki ceramicznej z wprowadzonym pęknięciem

Fig. 5. Silicon nitride surface ball (a) and section (b) observation with ring crack defect

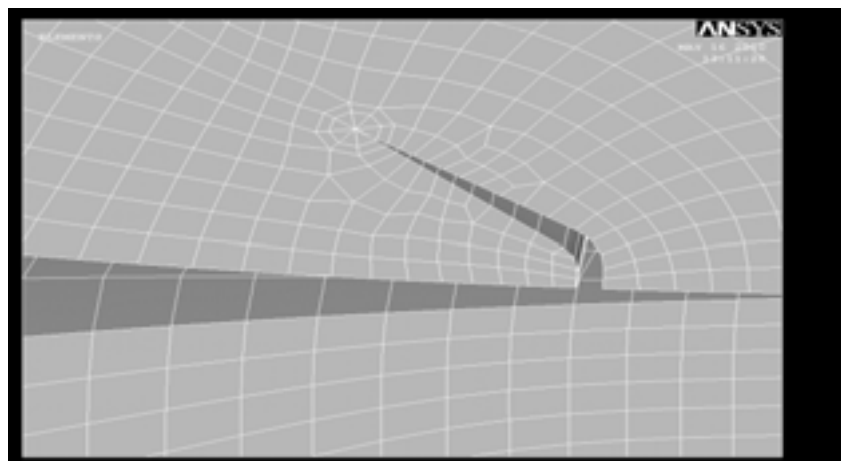


Rys. 6. Położenie pęknięcia hertzowskiego w stosunku do punktu styku kulek ceramicznych

Fig. 6. Position of ring crack according to ceramic balls contact point

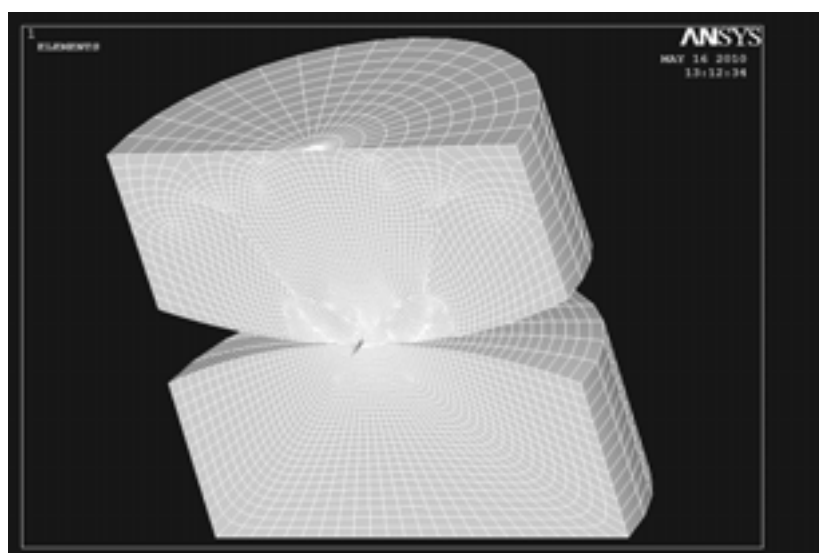
wano jako kąt pomiędzy teoretycznym stykiem dwóch kulek a wprowadzonym pęknięciem (**Rys. 6**). Naprężenia analizowano dla położeń: -3° , $-1,5^\circ$, $-0,75^\circ$, 0° , $0,75^\circ$, $1,5^\circ$, 3° .

Prezentowana poniżej analiza numeryczna jest analizą trójwymiarową, dla której na **Rys. 7** pokazano siatkę modelu MES w obrębie pęknięcia, natomiast na **Rys. 8** pokazano model MES kontaktu dwóch kulek. Analizę przeprowadzono dla azotku krzemu ($E = 324 \text{ GPa}$, $\nu = 0,27$, model liniowo-sprężysty) przy założeniu współczynnika tarcia 0,3 i obciążeniu w styku dwóch kulek równym 409 N.



Rys. 7. Siatka modelu MES w obrębie pęknięcia

Fig. 7. Mesh distribution of FEA around crack



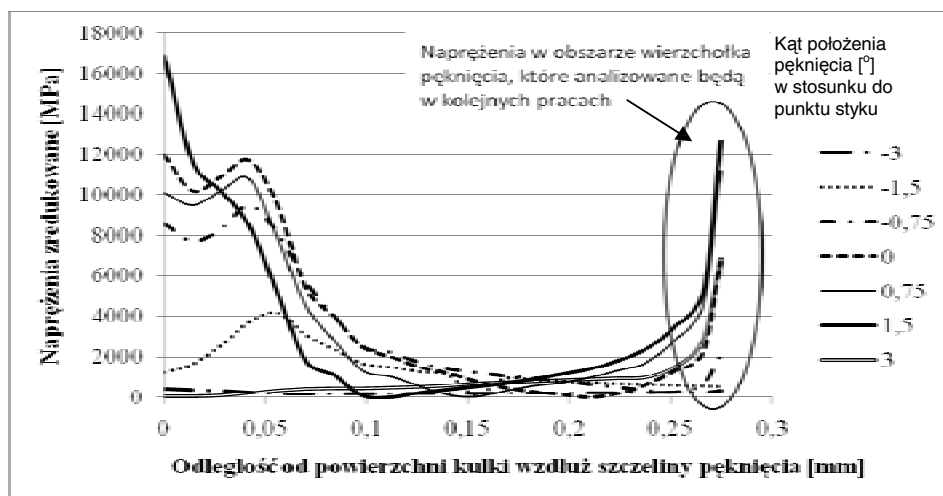
Rys. 8. Model MES kontaktu dwóch kulek ceramicznych

Fig. 8. FEA model of two ceramic balls

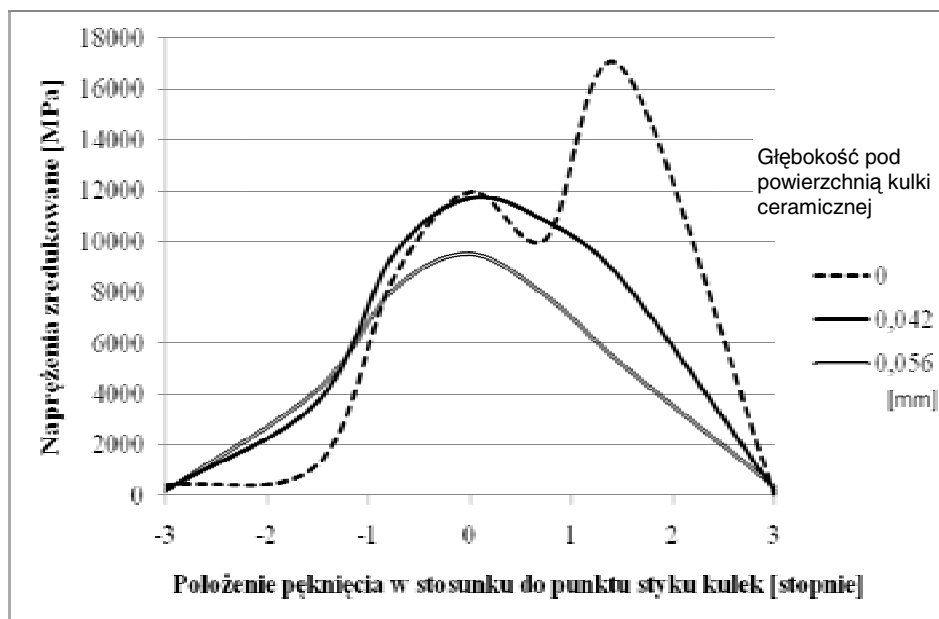
Na podstawie przeprowadzonej analizy numerycznej dla poszczególnych kątów położenia pęknięcia w stosunku do styku kulek wykonano wykres naprężeń zredukowanych dla określonych miejsc na czole pęknięcia odległych od powierzchni kulki ceramicznej (**Rys. 9, 10**). Należy zazna-

czyć, iż naprężenia w obrębie wierzchołka pęknięcia nie są miarodajne, gdyż należy uwzględnić teorię mechaniki pęknięcia w tym obszarze, co będzie dalszym etapem prac. Zatem dalsza analiza dotyczyć będzie obszaru pęknięcia poza jego wierzchołkiem.

Analiza MES pokazuje, iż największe naprężenia zredukowane występują na powierzchni kulki ceramicznej, jak również bezpośrednio pod powierzchnią (**Rys. 9**). Należy zauważyć, iż największe naprężenia występują tylko dla jednego położenia pęknięcia w stosunku do punktu styku kulek ($1,5^\circ$). Dla pozostałych położen największe naprężenia występują w odległości około 0,04–0,05 mm pod powierzchnią kulki. Naprężenia te występują w miejscu, gdzie kierunek pęknięcia zmienia się z pionowego na kątowy poprzez promień 0,05 mm (**Rys. 4**). Jest to zgodne z badaniami doświadczalnymi, które wykazały, iż propagacja pęknięć następuje bezpośrednio pod powierzchnią kulki ceramicznej i w głównej mierze decyduje o trwałości tego typu skojarzeń [**L. 12–14**]. Propagacja pęknięć podpowierzchniowych ma miejsce w postaci kolejnych pęknięć kolistych, które po dotarciu do powierzchni powodują gwałtowne jej niszczenie [**L. 11, 14**].



Rys. 9. Wartość naprężeń zredukowanych wzdłuż szczeliny pęknięcia
Fig. 9. Von Mises stresses along crack



Rys. 10. Wartość naprężeń zredukowanych w stosunku do położenia punktu styku kulek ceramicznych

Fig. 10. Von Mises stresses versus ceramic balls contact point

Na Rys. 10 pokazano wykres wartości naprężeń zredukowanych dla wybranych miejsc pod powierzchnią kulki ceramicznej. Z wyjątkiem powierzchni wartości maksymalne naprężeń zredukowanych występują w miejscu położenia początku pęknięcia na styku dwóch kulek.

PODSUMOWANIE

Analiza naprężeń metodą elementów skończonych pokazała, iż największe naprężenia zredukowane w otoczeniu pęknięcia występują na powierzchni kulki ceramicznej, jak i bezpośrednio pod jej powierzchnią. Szczególnie te ostatnie są istotne z punktu widzenia trwałości analizowanych skojarzeń. Miejsce występowania tych naprężeń jest źródłem propagacji pęknięć wtórnych, które decydują o trwałości tego typu skojarzeń. Potwierdzają to również przeprowadzone wcześniej badania doświadczalne [L. 12–14]. Dodatkowo należy zwrócić uwagę, iż znaczące naprężenia pojawiające się pod powierzchnią kulki ceramicznej mają miejsce dla położenia pęknięcia od $-0,75^\circ$ do $+1,5^\circ$ w stosunku do punktu styku

kulek. Zatem tylko w tym obszarze może dojść do propagacji pęknięć. Poniżej 0,05 mm pod powierzchnią kulki ceramicznej dla wszystkich badanych położań pęknięć w stosunku do miejsca styku następuje znaczne zmniejszenie naprężeń zredukowanych wzdłuż szczeliny pęknięcia.

Jako dalszy etap prac przewidziano analizę naprężeń w okolicy wierzchołka pęknięcia zgodnie ze zjawiskami określonymi przez mechanikę pęknięcia.

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

LITERATURA

1. Wereszczak A.A., Wang W., Wang Y., Hadfield M., Kanematsu W., Kirkland T.P., Jadan O.M.: Rolling contact fatigue of ceramics – report, Bournemouth University, UK, 2006.
2. Wang Y., Hadfield M.: Failure modes of ceramic rolling elements with surface crack defects, *Wear* 256, 2004, 208–219.
3. Hadfield M., Stolarski T.A., Cundill R.T., Horton S.: Failure modes of ceramic elements with ring crack defects, *Tribology International* 26, 1993, 157–164.
4. Cirel C., Stolarski T.A.: Factors affecting wear of ceramic balls, *Wear* 172, 1991, 191–196.
5. Wang L., Snidle R.W., Gu L.: Rolling contact silicon nitride bearing technology: a review of recent research, *Wear* 246, 2000, 159–173.
6. Hanson M.T., Keer L.M.: An analytical life prediction model for the crack propagation occurring in contact fatigue failure, *ASLE Trans.* 35, 1992, 354–360.
7. Wang Y., Hadfield M.: The influence of ring crack location on the rolling contact fatigue failure of lubricated silicon nitride: experimental studies, *Wear* 243, 2000, 157–166.
8. Wang Y., Hadfield M.: The influence of ring crack location on the rolling contact fatigue failure of lubricated silicon nitride: fracture mechanics analysis, *Wear* 243, 2000, 167–174.
9. 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.
10. Hadfield M., Fujinawa G., Stolarski T.A., Tobe S.: Residual stress in failed rolling contact ceramic balls, *Ceramics International*, vol. 19, No. 5, 1993, 307–313.

11. 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.
12. Karaszewski W.: The influence of oil additives on spread cracks in silicon nitride, *Tribology International*, vol. 41, issue 9–10, 2008, 889–895.
13. Karaszewski W.: Wpływ pęknięć kolistych na wytrzymałość zmęczeniową azotku krzemu. *Tribologia*, R. 35 nr 3, 2004, 159–168.
14. Karaszewski W.: Wady powierzchniowe ceramicznych elementów tocznych, *Acta Mechanica et Automatica*. - Vol. 3, nr 1(7), 2009, 68–70.
15. Karaszewski W., Ograniczenie trwałości skojarzeń ceramicznych w wyniku propagacji pęknięć powierzchniowych. *Tribologia*, R. 40 nr 2, 2009, 29–38.

Recenzent:
Dariusz BOROŃSKI

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.

A stress analysis of crack propagation by the finite element method of silicon nitride material was described in the paper. Ring cracks were modelled based on microscopic analysis of artificial induced cracks made onto silicon nitride balls. The stress analysis of cracks was performed in relation to the contact position of two ceramic balls.

Numerical stress analysis shows that the maximum value of von Mises stresses is 0.04 – 0.05 mm below the ceramic ball surface where the cracks change direction. The results are in accordance with experimental research and confirm that crack propagation takes place directly below the ball surface.

