



POLITECHNIKA  
GDAŃSKA

WALDEMAR KARASZEWSKI

BADANIE WPŁYWU  
WYBRANYCH CZYNNIKÓW  
NA TRWAŁOŚĆ CERAMICZNYCH  
ELEMENTÓW ŁOŻYSK TOCZNYCH

GDAŃSK 2013

PRZEWODNICZĄCY KOMITETU REDAKCYJNEGO  
WYDAWNICTWA POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ

*Janusz T. Cieśliński*

REDAKTOR PUBLIKACJI NAUKOWYCH

*Michał Szydłowski*

REDAKTOR SERII

*Marek Szkodo*

RECENZENCI

*Andrzej Neimitz*

*Tadeusz Stolarski*

PROJEKT OKŁADKI

*Jolanta Cieślawska*

Wydano za zgodą  
Rektora Politechniki Gdańskiej

Oferta wydawnicza Politechniki Gdańskiej jest dostępna pod adresem  
[www.pg.gda.pl/wydawnictwo/oferta](http://www.pg.gda.pl/wydawnictwo/oferta)

© Copyright by Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2013

Utwór nie może być powielany i rozpowszechniany, w jakiegokolwiek formie  
i w jakiegokolwiek sposób, bez pisemnej zgody wydawcy

ISBN 978-83-7348-504-4

WYDAWNICTWO POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ

---

Wydanie I. Ark. wyd. 13,6, ark. druku 12,6, 140/720

---

Druk i oprawa: *EXPOL* P. Rybiński, J. Dąbek, Sp. Jawna  
ul. Brzeska 4, 87-800 Włocławek, tel. 54 232 37 23

# SPIS TREŚCI

Wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów .....	5
1. WPROWADZENIE .....	7
2. CERAMICZNE ŁOŻYSKA TOCZNE .....	12
2.1. Trwałość ceramicznych łożysk tocznych .....	12
3. MATERIAŁY CERAMICZNE – PROCESY DESTRUKCJI .....	18
3.1. Proces inicjacji pęknięć i wady materiałowe .....	18
3.2. Proces propagacji pęknięć .....	20
3.3. Proces propagacji pęknięć w materiałach ceramicznych .....	23
3.4. Propagacja pęknięć kolistych w ceramicznych elementach tocznych .....	27
3.5. Wpływ środka smarującego na propagację pęknięć .....	46
3.6. Podsumowanie .....	59
4. SFORMUŁOWANIE PROBLEMATYKI BADAWCZEJ ŁOŻYSKOWYCH CERAMICZNYCH ELEMENTÓW TOCZNYCH .....	62
4.1. Wprowadzenie.....	62
4.2. Cel i zakres badań doświadczalnych .....	63
5. MODEL STYKU, OBCIĄŻENIA I PĘKNIĘCIA KOLISTEGO W CERAMICZNYCH ELEMENTACH TOCZNYCH .....	65
5.1. Analityczny opis modelu styku i obciążenia .....	65
5.1.1. Model styku i obciążenia .....	65
5.1.2. Geometria pęknięcia kolistego w ceramicznych elementach tocznych.....	70
5.2. Propagacja pęknięć.....	70
5.2.1. Kryterium propagacji pęknięć .....	71
5.2.2. Kierunek propagacji pęknięć .....	79
5.2.3 Wpływ oleju w szczelinie na proces propagacji pęknięć .....	81
6. BADANIA DOŚWIADCZALNE .....	83
6.1. Zakres i metodyka badań łożyskowych ceramicznych elementów tocznych.....	83
6.1.1. Zakres badań.....	83
6.1.2. Opis sztucznie wprowadzanych pęknięć .....	83
6.1.3. Opis materiałów użytych w badaniach .....	87
6.1.4. Opis stanowiska do badań kulek ceramicznych.....	94
6.2. Badania doświadczalne kulek łożyskowych z azotku krzemu .....	98
6.3. Badania doświadczalne kulek łożyskowych z dwutlenku cyrkonu .....	98
6.4. Badania doświadczalne kulek łożyskowych z tlenku aluminium .....	108
6.5. Analiza statystyczna .....	119
6.6. Analiza chemiczna .....	134
7. ANALIZA NUMERYCZNA .....	138
7.1. Analiza metodą elementów skończonych.....	138
7.1.1. Modelowanie metodą elementów skończonych .....	139
7.1.2. Model MES i ocena jego poprawności .....	139

---

7.1.3 Analiza numeryczna MES pęknięć kolistych w ceramicznych elementach tocznych .....	147
7.2. Analiza metodą elementów brzegowych .....	160
7.2.1. Modelowanie metodą elementów brzegowych .....	160
7.2.2. Ocena poprawności modelu MEB .....	163
7.2.3 Analiza numeryczna MEB pęknięć kolistych w ceramicznych elementach tocznych .....	163
8. PODSUMOWANIE .....	184
8.1. Podsumowanie uzyskanych wyników .....	184
8.2. Wnioski szczegółowe .....	185
8.3. Wnioski dotyczące dalszych badań .....	187
BIBLIOGRAFIA .....	189
Streszczenie .....	200
Streszczenie w języku angielskim .....	202