

**Mikrostruktura**  
**jako podstawa modelowania numerycznego**  
**właściwości tworzyw ceramicznych**

Grzegorz Grabowski

Wydawnictwo Naukowe  
AKAPIT

**Recenzenci:** Prof. dr hab. inż. Zbigniew Pędzich  
Dr hab. inż. Krzysztof Roźniatowski, prof. PW

**Afiliacja autora:** AGH Akademia Górniczo-Hutnicza,  
Wydział Inżynierii Materiałowej i Ceramiki,  
Katedra Ceramiki i Materiałów Ogniotrwałych

© Copyright by Grzegorz Grabowski  
and Wydawnictwo Naukowe AKAPIT,  
Kraków 2022  
Printed in Poland

**ISBN 978-83-65955-54-8**



Monografia została wydana na licencji: **Creative Commons**  
Uznanie autorstwa-Na tych samych warunkach 4.0 Międzynarodowe  
(CC BY-SA 4.0).

Treść licencji dostępna jest na stronie internetowej [CreativeCommons.org](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/legalcode.pl)  
pod adresem: <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/legalcode.pl>

Ministerstwo  
Edukacji i Nauki

Publikacja została dofinansowana z programu „Doskonała Nauka”  
Ministerstwa Edukacji i Nauki (nr wniosku: DNM/SP/514772/2021)

Nakład 250 egz.



Wydawnictwo Naukowe „Akapit”, Kraków  
tel. +48 608 024 572, [www.akapit.krakow.pl](http://www.akapit.krakow.pl)  
e-mail: [wn@akapit.krakow.pl](mailto:wn@akapit.krakow.pl)

# Spis treści

Wykaz ważniejszych skrótów i symboli . . . . .	5
Przedmowa . . . . .	7
Wstęp . . . . .	11
<b>Rozdział 1. Polikrystaliczne tworzywa ceramiczne . . . . .</b>	<b>13</b>
1.1. Budowa wewnętrzna polikrystalicznych tworzyw ceramicznych . . . . .	13
1.2. Wybrane właściwości fizyczne faz ceramicznych . . . . .	18
1.2.1. Sprężystość . . . . .	18
1.2.2. Wytrzymałość . . . . .	22
1.2.3. Kruchość . . . . .	25
1.2.4. Rozszerzalność cieplna . . . . .	31
1.3. Wpływ mikrostruktury na właściwości tworzyw ceramicznych . . . . .	34
1.3.1. Znaczenie mikrostruktury w opisie właściwości materiału . . . . .	34
1.3.2. Rozmiar kryształitów . . . . .	34
1.3.3. Kształt i orientacja ziaren . . . . .	38
1.3.4. Porowatość . . . . .	47
1.3.5. Granice międzyziarnowe . . . . .	52
1.4. Reszkowe naprężenia cieplne . . . . .	62
1.4.1. Naprężenia reszkowe . . . . .	62
1.4.2. Doświadczalne metody pomiaru naprężeń reszkowych . . . . .	68
1.4.3. Analityczne i numeryczne metody wyznaczania RTS . . . . .	77
1.4.4. Wpływ RTS na właściwości tworzyw ceramicznych . . . . .	95
1.5. Podsumowanie informacji o budowie i właściwościach tworzyw ceramicznych . . . . .	109
<b>Rozdział 2. Trójwymiarowa rekonstrukcja mikrostruktury . . . . .</b>	<b>111</b>
2.1. Mikrostruktura jako istotny element opisu właściwości polikryształów . . . . .	111
2.2. Ilościowy opis mikrostruktury . . . . .	112
2.2.1. Podstawowe parametry ilościowego opisu mikrostruktury . . . . .	112
2.2.2. Kształt cząstek . . . . .	116
2.2.3. Rozmiar cząstek . . . . .	118
2.2.4. Odległość i rozmieszczenie cząstek . . . . .	122
2.2.5. Zmienność cech mikrostruktury . . . . .	123
2.3. Przetwarzanie i analiza obrazu . . . . .	131
2.3.1. Wprowadzenie do przetwarzania i analizy obrazu . . . . .	131
2.3.2. Przetwarzanie obrazu . . . . .	133
2.3.3. Analiza obrazu . . . . .	137

2.4.	Trójwymiarowa rekonstrukcja mikrostruktury – stosowane koncepcje . . . . .	140
2.5.	Metody doświadczalne . . . . .	142
2.5.1.	Wstępne kryteria wyboru metod doświadczalnych . . . . .	142
2.5.2.	Metoda przekrojów seryjnych . . . . .	143
2.5.3.	Mikrotomografia komputerowa . . . . .	149
2.5.4.	Podsumowanie metod doświadczalnych . . . . .	159
2.6.	Metody symulacyjne i geometryczne . . . . .	162
2.6.1.	Wprowadzenie do metod symulacyjnych i geometrycznych . . . . .	162
2.6.2.	Automaty komórkowe . . . . .	162
2.6.3.	Monte Carlo Potts . . . . .	164
2.6.4.	Metody geometryczne . . . . .	167
2.7.	Podsumowanie metod rekonstrukcji mikrostruktury . . . . .	174
<b>Rozdział 3. Obliczeniowa inżynieria materiałowa . . . . .</b>		<b>177</b>
3.1.	Mikromechanika . . . . .	177
3.2.	Modele analityczne . . . . .	178
3.3.	Mikromechanika obliczeniowa . . . . .	181
3.3.1.	Metody przybliżone w mikromechanice . . . . .	181
3.3.2.	Skale budowy materiałów . . . . .	182
3.4.	Reprezentatywność . . . . .	188
3.4.1.	Reprezentatywny element objętościowy . . . . .	188
3.4.2.	Statystyczny element objętościowy . . . . .	193
3.5.	Wirtualne laboratorium . . . . .	204
3.5.1.	Koncepcja wirtualnego laboratorium . . . . .	204
3.5.2.	Cyfrowa reprezentacja materiału . . . . .	205
3.5.3.	Zintegrowana obliczeniowa inżynieria materiałowa . . . . .	210
<b>Rozdział 4. Przykłady zastosowań modeli obliczeniowych opartych na cyfrowej rekonstrukcji mikrostruktury – prace własne . . . . .</b>		<b>215</b>
4.1.	Podział modeli obliczeniowych . . . . .	215
4.2.	Modele 2D . . . . .	216
4.2.1.	Dwuwymiarowe modele geometryczne . . . . .	216
4.2.2.	Modele obliczeniowe 2D . . . . .	218
4.2.3.	Przykłady wykorzystania modeli 2D . . . . .	223
4.3.	Modele 3D . . . . .	227
4.3.1.	Specyfika modeli 3D . . . . .	227
4.3.2.	Uproszczona syntetyczna mikrostruktura . . . . .	228
4.3.3.	Rekonstrukcja mikrostruktury . . . . .	230
4.3.4.	Reprezentatywność rekonstrukcji . . . . .	231
4.3.5.	Periodyczne warunki brzegowe . . . . .	235
4.3.6.	Przykłady wykorzystania modeli 3D . . . . .	238
4.4.	Podsumowanie . . . . .	246
<b>Bibliografia . . . . .</b>		<b>249</b>
<b>Spis rysunków . . . . .</b>		<b>313</b>
<b>Spis tabel . . . . .</b>		<b>317</b>