

# Analiza modelu 3D z mikrotomografu komputerowego w środowisku CAE

## Analysis of a 3D model obtained from a computer microtomograph in a CAE environment

HENRYK BĄKOWSKI  
DAMIAN HADRYŚ  
ANTONI JOHN\*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2019.1.9>

Import danych z mikrotomografu komputerowego można wykonać za pomocą darmowego narzędzia, jakim jest program FIJI. Pozwala on na zapisanie obrazu otrzymanego z mikrotomografu w formie bezstratnej \*.raw do formatu \*.stl po uprzedniej konwersji siatki trójkątów. W programie GMSH model geometryczny umożliwia wygenerowanie siatki elementów skończonych i wyeksportowanie do solvera MES.

**SŁOWA KLUCZOWE:** model 3D CAD, mikrotomograf

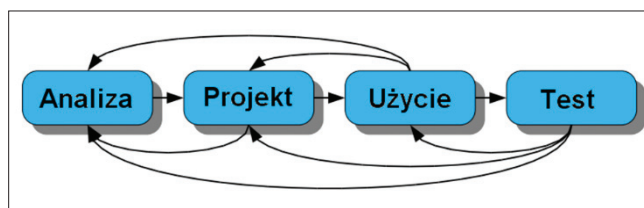
*Data import from a computer microtomograph can be performed using a free tool, ie the FIJI program. The possibilities of this program allow you to save the image obtained from the microtomograph in a lossless (\*.raw) format to \*.stl format. In the GMSH program, the geometric model allows you to generate a mesh and export to a FEM solver.*

**KEYWORDS:** model 3D CAD, microtomograph

Zbudowanie odpowiedniego modelu geometrycznego analizowanej warstwy wierzchniej jest dość złożonym zadaniem. Stopień jego trudności zależy od stopnia skomplikowania i przyjętej dokładności odwzorowania danego fragmentu powierzchni w modelu, a także od umiejętności posługiwania się programami CAE przez użytkownika. Model geometryczny można uprościć, aby ułatwić jego tworzenie i skrócić czas obliczeń. Polega to na usunięciu elementów nieistotnych z punktu widzenia analizowanego zjawiska, takich jak promienie, fazy czy otwory [1].

### Etapy projektu

Fazę przygotowywania modelu przedstawiono na rys. 1 jako cyklicznie powtarzający się schemat testowania, w którym następuje powrót do poprzedniego etapu i wprowadzenie nowych informacji, jeżeli rozwiązanie nie zostanie znalezione.



Rys. 1. Schemat postępowania podczas konwersji modelu 3D

Dzięki odpowiedniemu oprogramowaniu tomografy umożliwiają uzyskanie przekrojowych obrazów badanych przedmiotów, a także – co jest istotną zaletą tych urządzeń – budowanie obrazów przestrzennych typu CAD na potrzeby inżynierii odwrotnej (*reverse engineering*) [3].

### Model 3D z mikrotomografu komputerowego

Odpowiednio do rosnącego zapotrzebowania na dane diagnostyczne charakteryzujące się wysoką rozdzielczością przestrzenną i kontrastową producenci oferują szeroki wybór tomografów komputerowych. Różnią się one głównie parametrami konstrukcyjnymi i programowymi (rys. 2), jednak ich podstawowe elementy pozostają niezmienne.

Główne komponenty tomografów komputerowych można zwykle podzielić na cztery kategorie:

- **system obrazowania** (znany również jako skaner), w skład którego wchodzi gantry oraz stół pomiarowy;
- **system komputerowy** do cyfrowego przetwarzania i analizowania danych;
- **system prezentacji obrazu**, znajdujący się w pomieszczeniu kontrolnym razem z konsolą operatorską, służącą do planowania i przeprowadzania badania;
- **zdalne stacje opisowe**, używane do oglądania oraz rekonstrukcji obrazów [4].



Rys. 2. Nanotomograf – stanowisko pomiarowe [5]

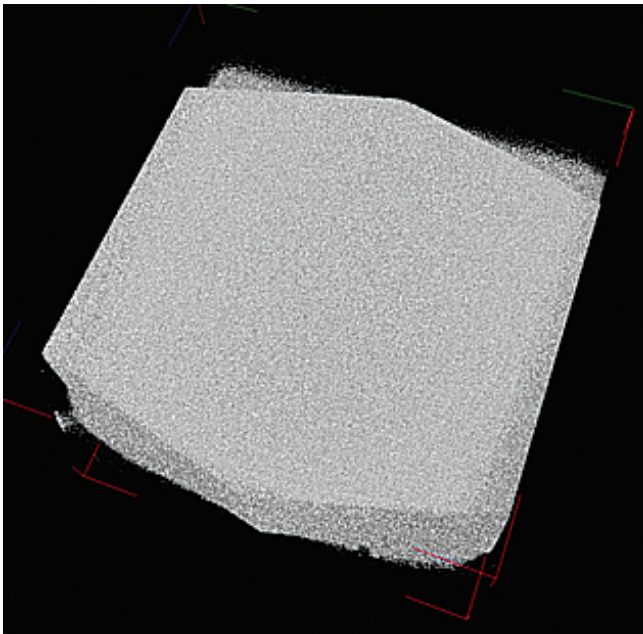
Głównym źródłem promieniowania X w tomografach komputerowych jest lampa rentgenowska. Rozpędzona wysokim napięciem wiązka elektronów uderza w metalową tarczę i – tracąc swą energię kinetyczną na skutek

\* Dr inż. Henryk Bąkowski (henryk.bakowski@polsl.pl), dr inż. Damian Hadryś (damian.hadrys@polsl.pl), prof. dr hab. inż. Antoni John (antoni.john@polsl.pl) – Politechnika Śląska

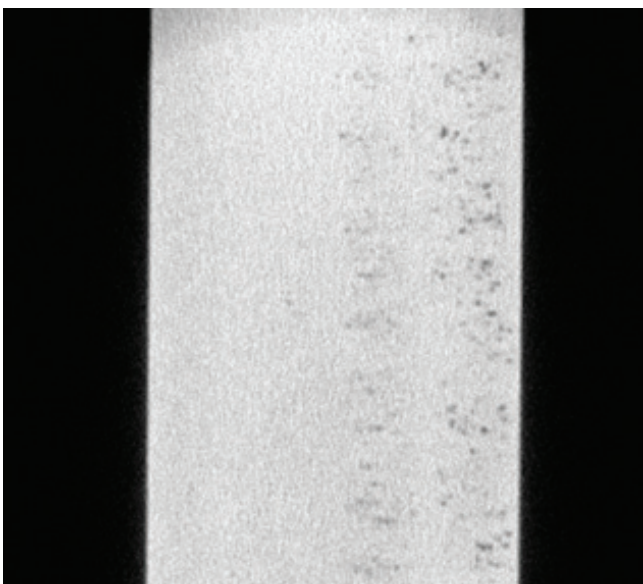
gwałtownego hamowania – wypromieniowuje tę energię w postaci kwantów promieniowania X, których zdolność penetracji jest tym większa, im większe było napięcie przyspieszające elektrony w lampie. Trzeba jednak zaznaczyć, że zbyt duże napięcie może trwale uszkodzić matryce detektorów.

Tomografia rentgenowska to nieniszcząca metoda badania np. powierzchni różnych obiektów. Polega ona na rejestracji stopnia osłabienia promieniowania rentgenowskiego, przechodzącego przez badaną próbkę. To osłabienie zależy od drogi, jaką promieniowanie przebywa w materiale, czyli od grubości tego materiału i jego zdolności do pochłaniania promieniowania. W przypadku przedmiotów wykonanych z materiałów innych niż stal czy żeliwo przenikalność jest większa (np. dla aluminium wzrasta prawie trzykrotnie) [4].

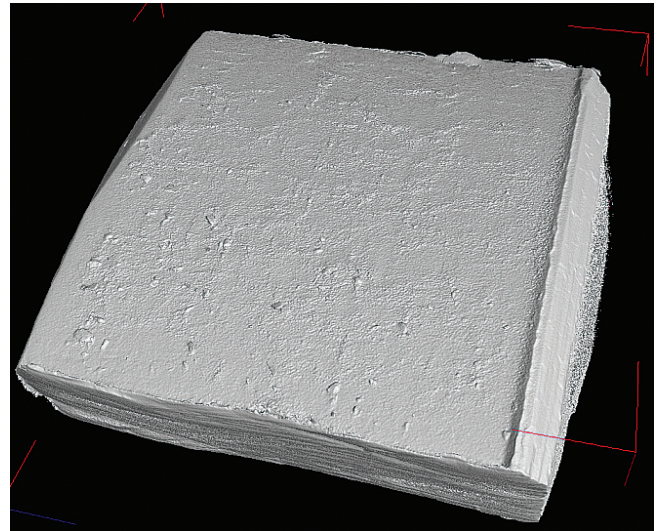
Kluczowe znaczenie ma również rozdzielczość. Przykładowo podczas badania dużej i płaskiej próbki, wykonanego z rozdzielczością 50  $\mu\text{m}$ , następuje rozpraszanie promieniowania, a powstający szum uniemożliwia wizualizację miejsca tarcia (rys. 3).



Rys. 3. Obraz powierzchni z widocznym szumem (ziarnistość)



Rys. 4. Wady w warstwie wierzchniej próbki



Rys. 5. Obraz pierwotny (z tomografu komputerowego)

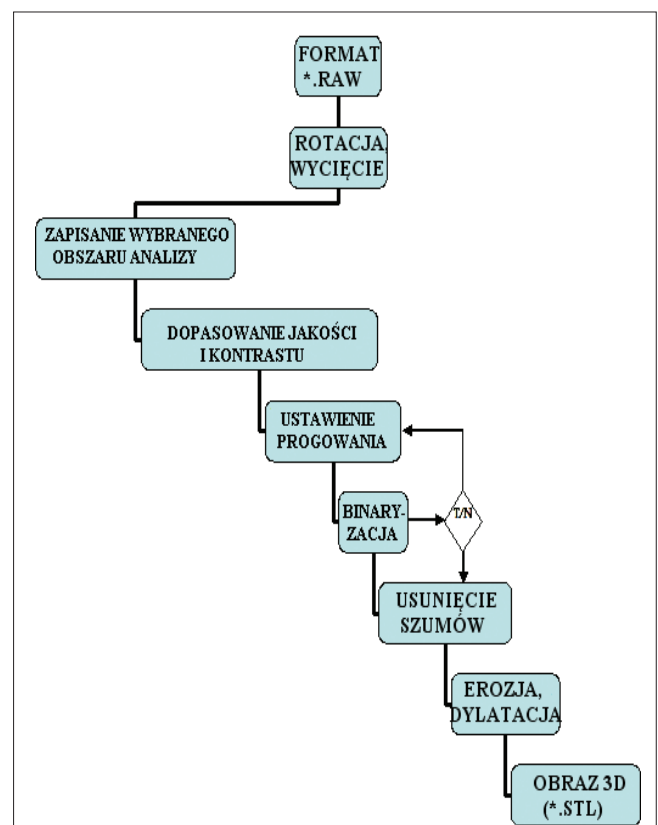
Za pomocą tomografów komputerowych można wyznaczyć nie tylko wymiary przedmiotów, lecz także wady materiałowe – np. pęknięcia, nieciągłości materiału, wtrącenia innych materiałów czy wady struktury (rys. 4).

W niniejszym przypadku analizie poddano profil chropowatości. Skoncentrowano się na badaniu fragmentu (wycinka) powierzchni tarcia (rys. 5).

### Konwersja modelu 3D

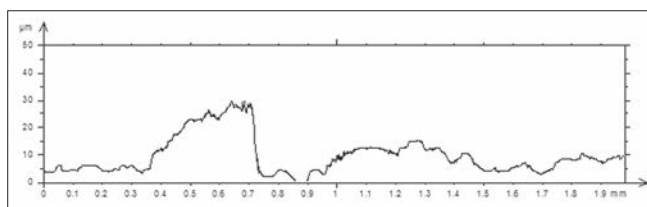
Zjawiska kontaktowe w elementach pojazdów i maszyn często mają swe źródła w fazach projektowania i wytwarzania.

Etapy konwersji do modelu 3D przedstawiono na rys. 6. W efekcie realizacji poszczególnych etapów tworzenia modelu geometrycznego [6] otrzymano wynik w postaci profilu chropowatości (rys. 7).



Rys. 6. Etapy procesu tworzenia modelu parametrycznego (3D)





Rys. 7. Przykładowy profil 2D chropowości powierzchni

## Model 3D CAD

Model otrzymany z tomografu komputerowego można po konwersji wykorzystać do analizy metodą elementów skończonych. W tym celu należy przeprowadzić dyskretyzację modelu, czyli podzielić go na skończoną liczbę elementów (utworzyć siatkę).

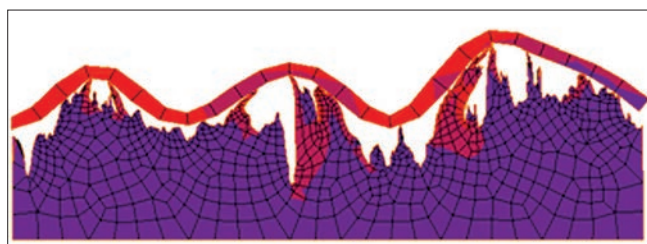
Niekiedy konieczne może się okazać zagęszczenie siatki elementów w obszarach szczególnie obciążonych warunkami brzegowymi. Pozwala to na dokładne odwzorowanie rozkładu naprężeń i odkształceń oraz ich wartości, co nie byłoby możliwe w przypadku zastosowania siatki zdegenerowanej. Z drugiej jednak strony zagęszczanie siatki w nieskończoność może implikować rozbieżności poszukiwanych niewiadomych. Najgęstszą siatkę należy zastosować tam, gdzie spodziewane są duże zmiany naprężeń. Zagęszczenie siatki w warstwie powierzchniowej pozwoli na dokładniejsze wyznaczenie położenia maksimum naprężeń zastępczych [7].

W oprogramowaniu do analizy MES zazwyczaj jest do dyspozycji kilka rodzajów siatek, w tym tetragonalna i heksagonalna; możliwe jest również ręczne wygenerowanie własnej siatki. Osoby nieposiadające dużego doświadczenia w opracowywaniu modeli MES mogą skorzystać z opcji generowania siatki przez automat. Większość takich automatów pozwala na utworzenie siatki heksagonalnej i tetragonalnej.

O ile automatyczne wygenerowanie siatki heksagonalnej nie powoduje problemów, to przy siatce tetragonalnej, utworzonej za pomocą funkcji Automesh, mogą się pojawić poważne błędy.

Dokładność odwzorowania geometrii zależy od zastosowanej metody dyskretyzacji. Wysoka wydajność generatorów siatek w przypadku metody elementów skończonych wynika ze stosowania prostego podziału modelu na zbiór prostopadłości (w układzie kartezjańskim), o ścianach równoległych do płaszczyzn układu współrzędnych. W praktyce taka siatka rzadko pozwala na dokładne odwzorowanie kształtu przedmiotu.

Generatory siatek elementów skończonych są bardziej elastyczne w działaniu, jednak utworzenie siatki z ich użyciem często wymaga więcej czasu. Mniejsza efektywność manualnego generowania siatki wynika z konieczności automatycznego poszukiwania takiego jej zagęszczenia, które odwzoruje szczegóły modelu CAD – położenie węzłów siatki nie jest zadawane z góry. Dodatkowo lokalne zagęszczanie siatki jest wykonywane przez projektanta



Rys. 8. Przykład analizy MES z siatką elementów skończonych o różnym stopniu zagęszczenia

w celu poprawy odwzorowania zmian kształtu czy cech materiału. Wybór stopnia dyskretyzacji, czyli zagęszczenia siatki obliczeniowej, jest zawsze kompromisem między dokładnością symulacji i czasem obliczeń. Każdy problem ma typową dla siebie tolerancję dokładności [7]. Optymalna siatka obliczeniowa powinna zapewnić wystarczająco dokładne wyniki bez niepotrzebnego zwiększania kosztu symulacji (rys. 8).

Siatkę elementów skończonych można otrzymać po zaimportowaniu pliku do programu GMSH lub MeshLab. Program składa się z trzech głównych modułów:

- Geometry,
- Mesh,
- Solver.

Aby było możliwe utworzenie siatki elementów skończonych, należy wczytać siatkę złożoną z powierzchni i „wypełnić” objętością, a następnie w module Mesh wygenerować siatkę. W module Solver można wybrać format, do jakiego ma być wyeksportować plik [8].

## Podsumowanie

Możliwości programu FIJI ImageJ są dosyć szerokie i zaawansowane. Oprogramowanie pozwala na wyświetlanie, edytowanie, przetwarzanie czy drukowanie grafik – zarówno 8-, jak i 16- czy 32-bitowych. W ImageJ można otwierać obrazy zapisane w powszechnie stosowanych i popularnych formatach (TIFF, RAW, GIF, JPEG, BMP, PNG, PGM, ASCII). Ponadto wspierany jest system zapisu DICOM (*Digital Imaging and Communications in Medicine*), stosowany w obrazowaniu medycznym, czy FITS (*Flexible Image Transport System*), stosowany w obszarze astronomii i wykorzystywany m.in. przez NASA czy IAU. Ogromną zaletą programu jest jego szybkość, co ma ogromne znaczenie w przypadku bardzo dużych plików, zwłaszcza jeśli są one przetwarzane na słabszych komputerach.

Reasumując, program, który jest przeznaczony przede wszystkim do zastosowań technicznych, można z powodzeniem wykorzystać do analizy zjawisk zachodzących w strefie kontaktu.

## LITERATURA

1. Bąkowski H., Stanik Z. „Applications of FEM for explanation of influence of the operating parameters upon failure wear of the piston in a diesel engine”. *Mechanik*. 4 (2010): s. 298–299.
2. Botha Ch. „DeVIDE – The Delft Visualisation and Image processing Development Environment”. The Netherlands: TU Delft, 30 May 2005.
3. Burger W., Burge M. „Digital Image Processing. An Algorithmic Introduction Using Java”. Springer, 2008.
4. Budzik G., Dziubek T., Turek P. „Budowa tomograficznych systemów komputerowych”. *Problemy Nauk Stosowanych*. 3 (2015): s. 005–014.
5. home.agh.edu.pl/~tarasiuk/MINT/index.php/tomografia (dostęp: 19.11.2018 r.).
6. fiji.sc/Fiji (dostęp: 19.11.2018 r.).
7. Bąkowski H., Posnyk A. „Finite elements method aided analysis of the wear of some selected sub-assemblies in technical means of transport”. *Finite element method for transport applications*. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2011.
8. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. „The finite element method”. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000.