

Marcin Janaszewski^{*,**}, Laurent Babout^{*}

Detekcja mostów w obrazach 3D prezentujących propagację pęknięć korozyjnych naprężeniowych w stali nierdzewnej

1. Wprowadzenie

Przewidywanie pęknięć jest zadaniem, które odgrywa istotną rolę w mechanice i nauce o materiałach. Przykładowo czas propagacji szczeliny w krytycznych dla bezpieczeństwa elementach wykorzystywanych w lotnictwie lub w energetyce może być zdeterminowany poprzez wczesne etapy rozwoju szczeliny, jako że szybkość rozrostu szczeliny na tych etapach jest niewielka. Ważnym przykładem, mającym zastosowanie w energetyce, są pęknięcia korozyjne naprężeniowe w stali nierdzewnej [8]. Badania z wykorzystaniem mikrotomografii pokazują, że inicjacja i propagacja pęknięć w tego typu materiale występuje wzdłuż granic krystalitów [1]. Ponadto badania pokazują występowanie lokalnych wiązań w materiale, rozpiętych pomiędzy gałęziami szczeliny. Zwykle szczelina po napotkaniu takiego wiązadła rozwidla się i łączy po jego ominięciu. Stąd wiązadła te zwane są mostami i stanowią bardziej odporne na korozję i naprężenia granice pomiędzy krystalitami. Przewiduje się, że wymagania mechaniczne do rozerwania mostów podczas rozrostu szczeliny mają bezpośredni wpływ na szybkość jej rozwoju a co za tym idzie czas użyteczności materiału [6]. Stąd lokalizacja oraz pomiar rozmiaru mostów ma kluczowe znaczenie dla budowy metod optymalizacji odporności materiałów [6].

Z punktu widzenia przetwarzania obrazów lokalizacja i ilościowy pomiar parametrów geometrycznych mostów jest zadaniem trudnym. Mosty stanowią część ciągłego materiału a ilościowa charakterystyka ich wokseli odzwierciedla jedynie przynależność do materiału i niczym nie różni się od charakterystyki jego pozostałych wokseli. Stąd mostów nie można wyodrębnić z obrazu z wykorzystaniem standardowych metod segmentacji.

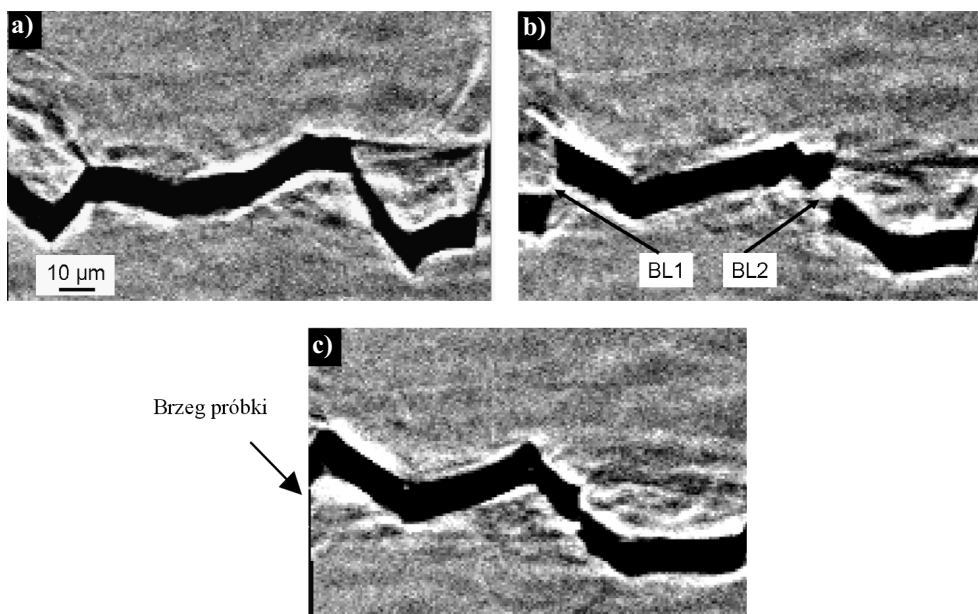
2. Obrazy 3D prezentujące propagacje pęknięć korozyjnych naprężeniowych

Na rysunku 1 zaprezentowano typową serię obrazów szczeliny korozyjnej naprężeniowej wewnątrz stali nierdzewnej. Obrazy otrzymano z wykorzystaniem systemu mikrotomo-

* Katedra Informatyki Stosowanej, Politechnika Łódzka w Łodzi

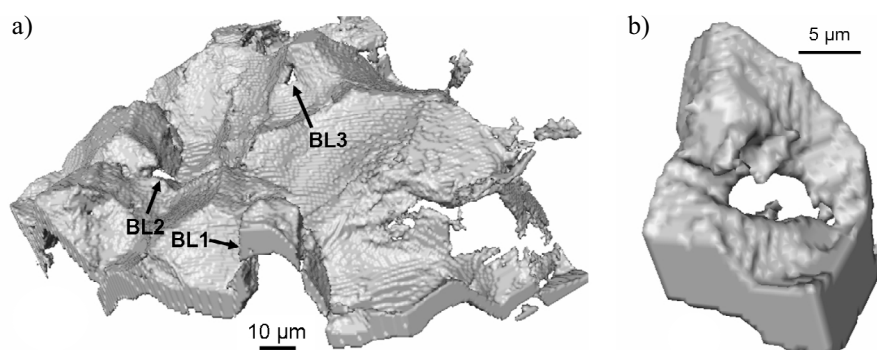
** Katedra Systemów Ekspertowych i Sztucznej Inteligencji, Wyższa Szkoła Informatyki w Łodzi

grafii rentgenowskiej ID19 beam line ESRF (Grenoble Francja). Rozdzielczość przestrzenna obrazów to $0,7 \mu\text{m}$, a energia zastosowanej wiązki promieni X wynosiła 30 keV . Białe obrzeża otaczające szczelinę są rezultatem różnicy między wartościami współczynnika załamania światła (*optical indices*) szczeliny (powietrze) i materiału (stal). Efekt ten jest powszechnie nazywany kontrastem fazowym [3]. Więcej szczegółów na temat eksperymentu, którego rezultatem są między innymi obrazy z rysunku 1, można znaleźć w [1]. Szczelina, która jest ciągła, począwszy od brzegu próbki na rysunku 1a, ulega przerwaniu, w dwóch miejscach na rysunku 1b, po czym ponownie jest ciągła na rysunku 1c. Te nieciągłości oznaczają występowanie wiązań mostowych (oznaczonych BL). Wiazań mostowe mogą być zdefiniowane jako niewielkie fragmenty materiału, które lokalnie wykazują podwyższoną odporność na pęknięcia korozyjne naprężeniowe [1, 6].



Rys. 1. Seria trzech sąsiednich przekrojów prezentujących szczelinę: a) szczelina jest ciągła; b) występują dwa obszary nieciągłości BL1 i BL2; c) Szczelina jest znów ciągła. Odległość pomiędzy przekrojami wynosi $7 \mu\text{m}$

Przestrzenną wizualizację fragmentu szczeliny zaprezentowanej na rysunku 1 pokazano na rysunku 2, gdzie izopowierzchnia odzwierciedla topografię granic krystalitów tzn. płaskie ściany i ostre krawędzie. Na rysunku 2a wyraźnie widać mosty BL2 i BL3. Ten pierwszy dodatkowo zaprezentowano w powiększeniu na rysunku 2b. Most BL1 jest niewidoczny na rysunku 2, ale dokładna, manualna analiza obrazu 3D wykazała, że znajduje się on na brzegu próbki. Ponadto w okolicy prawego dolnego rogu obrazu (rys. 2a) widać fragment szczeliny rozwidlającej się na dwie gałęzie, które następnie nie łączą się. Stąd między tymi dwoma gałęziami nie ma wiązania mostowego.



Rys. 2. Izopowierzchnia 3D szczeliny wraz z mostami BL1 i BL2 wyszczególnionymi na rysunku 1b (a); powiększony widok mostu BL2 (b)

Detekcja mostów może być realizowana poprzez manualną analizę obrazów 2D i 3D szczeliny jak pokazano wyżej. Jednak taka strategia jest zawodna oraz wymaga ogromnych nakładów czasowych na realizację.

Stąd detekcja i analiza mostów z wykorzystaniem algorytmów przetwarzania obrazów jest godną uwagi alternatywą, ale trzeba podkreślić, że jest to zadanie trudne, most można odróżnić od innych fragmentów materiału tym, że szczelina rozwidła się przed mostem i po jego ominięciu ponownie łączy. Analiza światowej literatury dotyczącej przetwarzania obrazów 3D, a w szczególności przetwarzania obrazów materiałów, pokazuje, że nie ma publikacji, która prezentuje rozwiązanie tego zadania.

3. Podstawowe pojęcia dotyczące obrazów 3D reprezentujących obiekty posiadające objętość

Podstawowe pojęcia dotyczące obrazów 3D reprezentujących obiekty posiadające objętość, które dalej w skrócie będą nazywane obrazami 3D, a reprezentowane obiekty obiektami 3D, są zdefiniowane w innych publikacjach np. [5, 9]. W tym rozdziale zostaną zaprezentowane jedynie wybrane pojęcia niezbędne do zrozumienia dalszej części artykułu. Ponadto zostanie zachowana notacja wprowadzona w [9]. Analizowane w niniejszym artykule obrazy 3D złożone są z wokseli – najmniejsza jednostkowa objętość w postaci sześciangu. Każdy woksel p reprezentowany jest za pomocą czwórki: (x_p, y_p, z_p, v_p) , gdzie (x_p, y_p, z_p) reprezentuje położenie woksela w przestrzeni 3D, a v_p reprezentuje jego przynależność. Jeżeli $v_p = 0$, to woksel p należy do tła, jeżeli natomiast $v_p = 1$, to woksel p należy do obiektu (w rozważanych tutaj obrazach należy do szczeliny). Woksel q jest **F-sąsiadem**, **E-sąsiadem**, **V-sąsiadem** woksela p wtedy, gdy ma z nim wspólny odpowiednio bok, krawędź, wierzchołek. O woksela p i q mówi się również, że są **F-połączone**, **E-połączone**, **V-połączone**. Dwa woksle są sąsiadami, jeżeli są przynajmniej V-połączone. Woksel należący do obiektu zwany jest **wokselem wewnętrznym**, jeżeli nie posiada sąsiada będącego

wokselem tła. W przeciwnym wypadku woksel należący do obiektu zwany jest **wokselem brzegowym**. Woksel, należący do tła, jest nazywany zewnętrznym, jeżeli wszyscy jego sąsiedzi należą do tła. W przeciwnym wypadku woksel jest nazywany brzegowym. Sekwencja wokseli $p_1, p_2, \dots, p_n$ nazywana jest *ścieżką*, jeżeli spełnia następujący warunek: p_i jest sąsiadem p_j wtedy i tylko wtedy, gdy $|i - j| = 1$, for $i, j = 1, 2, \dots, n$. Ścieżka $p_1, p_2, \dots, p_n$ nazywana jest *pętlą* wtedy i tylko wtedy, gdy p_1 i p_n są sąsiadami. Zbiór wokseli jest połączony, gdy dla każdej pary wokseli p, q z tego zbioru istnieje ścieżka złożona z wokseli tego zbioru łącząca p i q . Dwa zbiory wokseli A, B są połączone lub inaczej sąsiednie, jeżeli istnieją przynajmniej dwa voksele, jeden ze zbioru A , drugi ze zbioru B , które są sąsiadami.

3.1. Koncepcja otworu 3D

W niniejszym podrozdziale koncepcja mostu zostanie zdefiniowana w terminologii geometrii dyskretnej. Koncepcja mostu wprowadzona w poprzednich rozdziałach jest, w pewnym sensie, odpowiednikiem pojęcia otworu 3D w geometrii dyskretnej. W odróżnieniu od przypadku 2D, otwór 3D nie jest pojęciem prostym do zdefiniowania. Otwór 2D można zdefiniować jako zbiór pikseli tła otoczonych pikselami obiektu. Niestety otwór 3D nie jest podzbiorem przestrzeni 3D. W literaturze można jedynie spotkać definicję określającą warunek dostateczny występowania otworu w obiekcie 3D [5]. Zgodnie z tą definicją, warunkiem dostatecznym występowania otworu w obiekcie O jest występowanie pętli złożonej z wokseli należących do O , której nie można przekształcić, z wykorzystaniem elementarnych przekształceń zdefiniowanych, np. w [5], do jednego woksela. Przykładowo sfera nie posiada otworu, wypełniony torus posiada dwa otwory. Niestety zaprezentowanej definicji nie można wykorzystać do detekcji otworów 3D. Może być jedynie użyta do sprawdzenia czy obiekt posiada jeden lub więcej otworów (tzn. obiekt nie posiada otworu, jeżeli każda pętla wokseli obiektu może być przekształcona do jednego woksela).

3.2. Technika kodowania wokseli

Zgodnie z [9] kodowanie wokseli jest techniką rekursywnej propagacji i przypisywania wartości do wokseli obiektu objętościowego O , przy czym startuje ze zbioru S tzw. **wokseli startowych** (*seed voxels*), ($S \subset O$) i używa się specjalnego schematu do momentu spełnienia warunków zakończenia. Celem stosowania techniki kodowania wokseli jest uzyskanie transformaty obrazu, ułatwiającej analizę właściwości geometrycznych obiektów 3D. Zaprezentowane kodowanie wokseli jest bardzo popularną techniką analizy obrazu, np. [2, 7, 9].

Schemat propagacji kodu podczas kodowania wokseli jest podobny do schematu stosowanego w dyskretnej transformacji odległości. Wykorzystywany jest schemat: $n_f n_e n_v$ opisany za pomocą trzech liczb całkowitych dodatnich: n_f, n_e, n_v , ($n_f < n_e < n_v$). Pierwszy krok algorytmu to inicjalizacja wokseli obiektu O dużymi wartościami zwanymi umownie nieskończoność. Następnie rozpoczyna się propagację kodu, przypisując wokselom startowym wartości 0. Następnie dla każdego woksela startowego, wszyscy jego F-sąsiedzi, E-sąsiedzi i V-sąsiedzi otrzymują odpowiednio kod: n_f, n_e, n_v . W i -tej iteracji przetwarzani są wszyscy sąsiedzi wokseli, którym przypisano nowy kod w iteracji $i - 1$. Załóżmy, że woksel p otrzymał kod n w iteracji $n - 1$. Stąd w i -tej iteracji każdy jego F-sąsiad, E-sąsiad

i V-sąsiad otrzyma odpowiednio nowy kod $n + n_f$, $n + n_e$, $n + n_v$, pod warunkiem, że nowy kod jest mniejszy od kodu, który woksel aktualnie posiada (zakłada się dodatkowo, że każda wartość kodu jest mniejsza od umownej wartości nieskończoności). Zaprezentowana procedura kodowania kończy się, gdy w następnej iteracji nie ma woksela do kodowania lub inne nałożone warunki zakończenia są spełnione (np. napotkanie określonego woksela).

Wybór schematu kodowania zależy od zastosowania. Najczęściej używane są następujące schematy: 1-2-3, 2-3-4, 3-4-5.

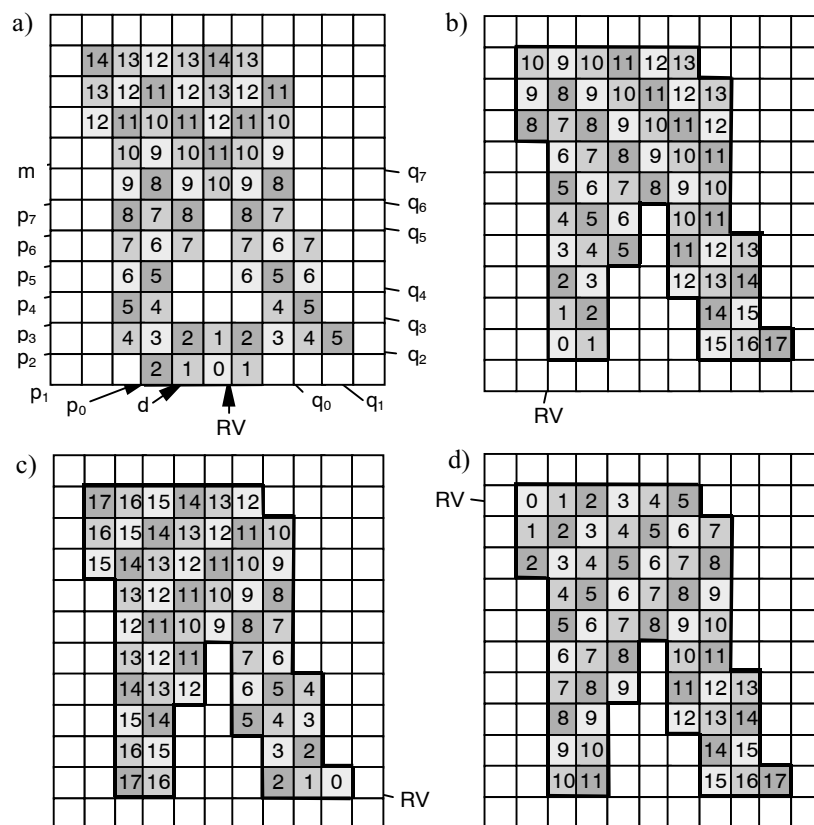
Wybór zbioru wokseli startowych zależy od celu realizacji kodowania. Najczęściej używane zbiory to: woksle brzegowe, co prowadzi do kodowania zwanego **brzegowym (kod BS; BS-code)** a wygenerowany obraz zwany jest **połem BS (BS-code)** oraz zbiór złożony z jednego woksela, co prowadzi do **kodowania SS (SS-code)** a wygenerowany w ten sposób obraz nazywany jest **połem SS (SS-field)**. Kodowanie SS przekształca obiekt w zbiór klastrów. Klaster zdefiniowany jest jako zbiór połączonych wokseli obiektu o tym samym kodzie SS. Kod klastra jest to liczba całkowita będąca kodem SS jego wokseli. Dodatkowo możemy rozważać pewne specyficzne klaster, które odgrywają szczególną rolę w detekcji pewnych właściwości topologicznych obiektu. **LMklaster** to klaster, który ma kod większy od kodu każdego swojego sąsiada. Przy czym sąsiedztwo klastrów zdefiniowane jest w sensie sąsiedztwa zbiorów wokseli. **Klaster łączący (merging cluster)** to klaster, który posiada więcej niż jednego sąsiada o kodzie o jeden mniejszym od własnego kodu. Sąsiedzi klastra k o kodzie jeden mniejszym od kodu k nazywani będą **poprzednikami (predecessors)** klastra k . **Klaster dzielący (dividing cluster)** to klaster, który posiada więcej niż jednego sąsiada o kodzie o jeden większym od własnego kodu. Sąsiedzi klastra k o kodzie jeden większym od kodu k nazywani będą **następnikami (successors)** klastra k . Wokselem środkowym (*medial woxel*) klastra k nazywamy woksel należący do k i mający największy BS kod spośród wszystkich wokseli z k .

Pierwszym krokiem algorytmu detekcji mostów jest realizacja kodowania SS z wykorzystaniem schematu 1-2-3. Woksel startowy tego kodowania SS, który będzie dalej nazywany wokselem referencyjnym (*reference voxel*) i oznaczany RV, może być wyznaczony przez użytkownika lub wybrany automatycznie. W prezentowanym podejściu zrealizowano automatyczny wybór RV, który polega na wykonaniu kodowania SS startując z dowolnego woksela obiektu. Następnie woksel o maksymalnym kodzie SS wybierany jest jako RV. Dla obiektów, które składają się z kilku rozłącznych części, trzeba wyznaczać RV według zaprezentowanej koncepcji, dla każdej części.

4. Metoda detekcji mostów

4.1. Detekcja mostów z wykorzystaniem klastrów łączących

Pole SS i klaster łączący można wykorzystać do detekcji mostów. Występowanie dowolnego klastra łączącego m pociąga za sobą występowanie przynajmniej dwóch ścieżek sąsiadujących klastrów: $p_0, p_1, \dots, p_n$ i $q_0, q_1, \dots, q_n$, które mają swój początek w jednym klastrze dzielącym d . Klaster p_0, q_0 są następnikami d oraz p_n, q_n są poprzednikami m . Przykład takiej sytuacji dla obrazu 2D zaprezentowano na rysunku 3a. Dowód powyższej tezy jest prosty i może być wsparty rysunkiem 3.



Rys. 3. Przykłady pola SS dla obiektu 2D. Małe kratki reprezentują piksel obrazu. Szare kratki reprezentują piksele obiektu. Na obrazach zastosowano trzy różne poziomy jasności dla wyodrębnienia sąsiednich klasterów. Granicę obiektu zaznaczono pogrubioną linią.

Na każdym rysunku zaznaczono RV. Na obrazach b), c), d) w dolnej części obiektu usunięto piksele, co w konsekwencji oznacza brak otworu. a) Obraz prezentuje sytuację, gdy mamy otwór i występują: klaster dzielący d , klaster łączący m oraz dwie ścieżki klasterów $p_0, p_1, \dots, p_7$; $q_0, q_1, \dots, q_7$ pomiędzy m i d . b) RV znajduje się w lewej gałęzi obiektu. Nie odnotowano występowania klastera łączącego. Występują dwa klasterze dzielące o kodach 9 i 10. c) RV znajduje się w prawej gałęzi obiektu. Nie odnotowano występowania klastera łączącego. Występuje jeden klaster dzielący o kodzie 12. d) RV znajduje się poza gałęziami obiektu (lewy górny róg obiektu). Występuje jeden klaster dzielący o kodzie 8

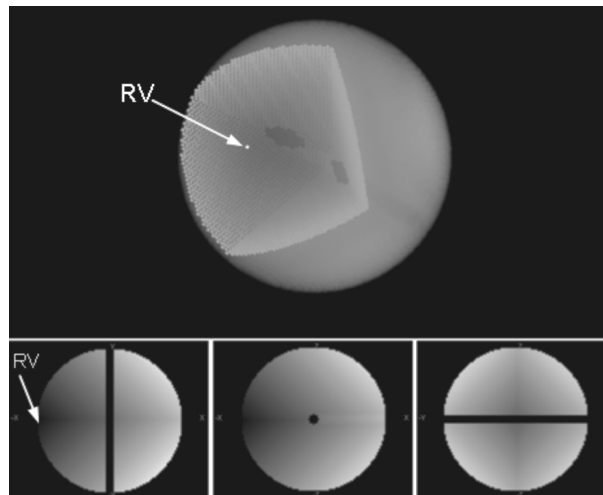
Jeżeli założymy, że wymienione wcześniej ścieżki klasterów nie mają początku w jednym klasterze dzielącym, wtedy możemy rozważać trzy przypadki:

- 1) RV należy do jednego z klasterów $p_0, p_1, \dots, p_n$ (rys. 3b). Załóżmy, że p_n posiada kod k . Wtedy m jako następnik p_n posiada kod $k + 1$. Woksele klastera q_n będące F-sąsiadami wokseli należących do m , zgodnie z procedurą kodowania, otrzymają kod $k + 2$, co oznacza, że m nie jest klasterem łączącym.

- 2) RV należy do jednego z klasterów $q_0, q_1, \dots, q_n$ (rys. 3c), przy podobnym jak w poprzednim punkcie założeniu, że q_{0n} posiada kod k . Wtedy m jako następnik q_n posiada kod $k + 1$. Woksele klastera p_n będące F-sąsiadami wokseli należących do m , zgodnie z procedurą kodowania, otrzymają kod $k + 2$, co oznacza, że m nie jest klasterem łączącym.
- 3) RV nie należy do żadnego z klasterów $q_0, q_1, \dots, q_n, p_0, p_1, \dots, p_n$ (rys. 3d). Wtedy zarówno q_n , jak i p_n posiadają ten sam kod o jeden większy od kodu klastera m (rys. 3d). Stąd m nie jest klasterem łączącym.

Podsumowując, w każdym z trzech rozważanych przypadków, założenie że dwie ścieżki klasterów nie łączą się w jednym klasterze dzielącym, doprowadziło do sprzeczności z założeniem, że m jest klasterem łączącym. Stąd wniosek, że dwie wspomniane ścieżki łączą się w jednym klasterze dzielącym d . Ponadto, klaster m , d i dwie ścieżki: $p_0, p_1, \dots, p_n$; $q_0, q_1, \dots, q_n$, otaczają woksele tła, które stanowią most.

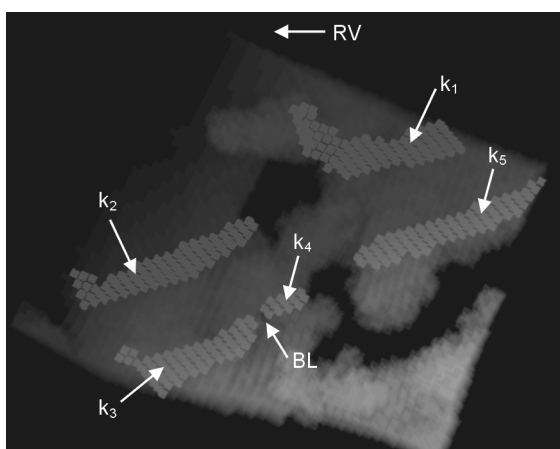
Niestety twierdzenie odwrotne postaci: występowanie mostu (otworu) pociąga za sobą występowanie klastera łączącego nie jest prawdziwe.



Rys. 4. Obraz 3D kuli zawierającej wąski cylindryczny otwór. Kulę wygenerowano z wykorzystaniem biblioteki ITK [4]. W dolnej części rysunku zaprezentowano trzy rzuty kuli. Odcienie szarości wokseli reprezentują wartości kodu SS (jaśniejsze odcienie reprezentują większe wartości kodu). Ponadto zaznaczono RV (woksel o kodzie 0)

Kula zawierająca cylindryczny otwór, jak na rysunku 4, jest prostym kontrprzykładem dla zaprezentowanego twierdzenia odwrotnego. Woksele półprzezroczystej kuli reprezentują kod SS (im większa wartość kodu tym większa jasność woksela). Na rysunku 4 zaznaczono również RV oraz przykładowy klaster c o kodzie 60 wyróżniony jasnym odcieniem szarości, w którym mały most (otwór) wycina dwa inne otwory, ale nie dzieli klastera na dwie części. Ponadto jak wykazała analiza transformaty w prezentowanym przypadku

nie ma klastera łączącego. Sytuacja taka jest rezultatem tego, że rozmiary klasterów są znacznie większe w porównaniu z rozmiarem mostu. Tym niemniej istnieje bardzo małe prawdopodobieństwo, że taka sytuacja wystąpi w analizowanych obrazach szczelin, które są długie, cienkie (grubość 1 woksela) i niewysokie, co pociąga za sobą charakterystyczny kształt klasterów przypominający wstążki. Typowe klasterzy po dokonaniu transformaty obrazu szczeliny zaprezentowano na rysunku 5, gdzie wyróżniono klasterzy c_1 i c_2 o kodzie 45 i klasterzy c_3 , c_4 , c_5 o kodzie 72. Na obrazie zaznaczono również bardzo mały most BL, który dzieli jeden klaster łączący na dwa: c_3 i c_4 .



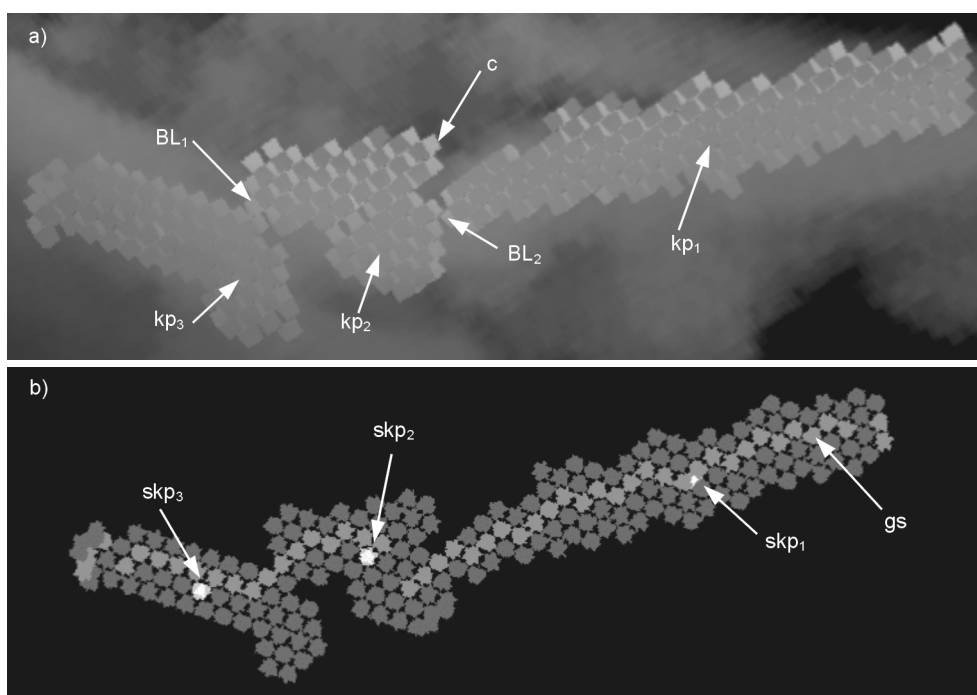
Rys. 5. Obraz 3D fragmentu szczeliny z kilkoma wyróżnionymi klasterami: $k_1 - k_4$ oraz mostem BL, który dzieli klaster łączący na dwa klasterzy k_3 i k_4

Kolejnym ważnym etapem dotyczącym analizy mostów jest wyznaczenie ich liczby. Stąd zostaną wprowadzone dwa dodatkowe pojęcia. **Prosty klaster łączący (PKL)** to klaster, który posiada dokładnie dwóch poprzedników. **Skomplikowany klaster łączący (SKL)** to klaster, który posiada więcej niż dwóch poprzedników. Dowolny PKL k wykrywa dokładnie jeden most. Uzasadnienie tej tezy jest proste. Poprzednicy k : k_1 , k_2 kończą ścieżki klasterów: ks_1 , ks_2 odpowiednio, które rozpoczynają się we wspólnym klastrze dzielącym d . Stąd k , ks_1 , ks_2 tworzą pętlę klasterów, która lokalizuje most. Ponadto nie ma innej pętli klasterów, która lokalizowałaby ten sam most, ponieważ te dwie pętle byłyby zagnieżdżone, co – biorąc pod uwagę procedurę transformaty obrazu w zbiór klasterów (podrozdz. 3.2) – jest niemożliwe.

4.2. Analiza skomplikowanych klasterów łączących

SKL wykrywa więcej niż jeden most. Ustalenie liczby mostów wykrywanych przez SKL jest w ogólnym przypadku zadaniem bardzo trudnym. W celu uproszczenia zadania jeszcze raz skorzystamy ze specyfiki obrazów szczelin, a w szczególności z faktu, że SKL są długie i niskie, a poprzednicy ułożeni są kolejno wzdłuż SKL. To założenie pozwala na wprowadzenie relacji porządku pomiędzy poprzednikami SKL.

Typowy SKL wyróżniono na rysunku 6a, gdzie za pomocą półprzeroczystych wokseli zaprezentowano powiększony fragment szczeliny z rysunku 1. Ponadto literą *c* zaznaczono długi klastery łączący, przykryty przez jego poprzedników kp_1 , kp_2 , kp_3 wyróżnionych ciemnym odcieniem szarości. Poprzednicy *c* identyfikują dwa mosty. Pierwszy BL_1 występuje tylko pomiędzy kp_1 i kp_2 , natomiast drugi BL_2 między kp_2 , kp_3 .



Rys. 6. Widok przykładowego klastra łączącego *c* o kodzie 147 uzyskanego wskutek transformaty obrazu szczeliny zaprezentowanego na rysunku 1. a) Na pierwszym planie widać poprzedników: kp_1 , kp_2 , kp_3 klastra *c*, wyróżnionych ciemnym odcieniem szarości. Zaznaczono również miejsca występowania mostów: BL_1 , BL_2 . Na drugim planie wyróżniono jasnym odcieniem szarości klastery *c*, zakryty w większej części przez poprzedników. b) Ciemnym odcieniem szarości wyróżniono woksele klastra *c*. Jasnym odcieniem szarości wyróżniono główną ścieżkę *gs* klastra *c*. Białym kolorem oznaczono środki ciężkości skp_1 , skp_2 , skp_3 poprzedników klastra *c*

Ogólnie jeżeli SKL posiada n poprzedników, to identyfikuje $n - 1$ mostów, ponieważ poprzednicy mogą być uporządkowani w listę i tylko między sąsiadami na tej liście występuje most.

Powyższe założenia wykorzystano do budowy algorytmu, który dla dowolnego SKL *c* porządkuje jego n poprzedników kp_1 , kp_2 , ..., kp_n w ten sposób, że most występuje pomiędzy każdą parą sąsiadów na uporządkowanej liście. Algorytm ten może być zaprezentowany w trzech etapach:

1. Generacja głównej ścieżki mp szkieletu klastra c . Ponieważ klastery można traktować jako obiekt, to można również generować fragment lub część jego szkieletu. Ponieważ klastery generowane dla obrazów szczelin są długie i niewysokie, to główna (najdłuższa) ścieżka szkieletu jest wystarczającą reprezentacją klastra, która posłuży do uporządkowania jego poprzedników. W celu wygenerowania ścieżki użyto algorytmu zaprezentowanego w [9].
2. Lokalizacja najbliższego woksła mv_i ścieżki gs dla środka ciężkości skp_i poprzednika kp_i , dla $i = 1, 2, \dots, n$.
3. Sortowanie listy poprzedników zgodnie z kolejnością mv_i w ścieżce głównej klastra wyrażoną indeksem imv_i . Im woxel mv_i jest bliżej początku ścieżki (im mniejszy imv_i), tym bliżej początku posortowanej listy znajduje się poprzednik cp_i .

Ostatecznie algorytm zwraca nową listę poprzedników, w której dla dwóch kolejnych poprzedników kp_i, kp_{i+1} mamy: $imv_i = imv_{i+1}$ oraz nie ma innego poprzednika kp_k ($k = 1, 2, \dots, n; k \neq i, j$) dla którego $imv_i < imv_k < imv_{i+1}$.

Wyniki zastosowania powyżej opisanego algorytmu dla przykładowego SKL zaprezentowano na rysunku 6b, gdzie analizowany klastery wyróżniono ciemnym odcieniem szarości. Jasnym odcieniem szarości wyróżniono, generowaną na pierwszym etapie algorytmu, główną ścieżkę gs klastra. Białym kolorem środki ciężkości poprzedników skp_1, skp_2, skp_3 .

Dla przykładu zaprezentowanego na rysunku 6 algorytm zwróci posortowaną listę poprzedników klastra c w następującej formie: kp_3, kp_2, kp_1 , co oznacza występowanie mostu między kp_3 i kp_2 oraz między kp_2 i kp_1 .

5. Dyskusja otrzymanych rezultatów

Zaprezentowany algorytm detekcji mostów przetestowano na kilku obrazach 3D prezentujących propagację szczeliny. W każdym przypadku algorytm realizował następujące operacje:

- kodowanie SS,
- generowanie klastrow,
- detekcja PKL, SKL,
- analiza SKL,
- ostatecznie zliczanie liczby mostów w obrazie.

Rezultaty były oceniane manualnie poprzez wizualizację. Analiza rezultatów działania algorytmu pokazała, że metoda klastrow łączących pozwala na bardzo skuteczne automatyczne wykrywanie mostów. Podczas wizualnej analizy obrazu przez autorów nie znaleziono żadnego mostu, który nie został wykryty metodą klastrow łączących. Ponadto autorzy nie znaleźli żadnego SKL, dla którego algorytm porządkowania poprzedników zwróciłby złe rezultaty. Należy również podkreślić, że metoda klastrow łączących pozwala na wykrywanie bardzo małych mostów, które są trudne do wykrycia manualnie, np. most BL_2 zaprezentowany na rysunku 6a, który ma szerokość jednego woksela i jest niemalże ze wszystkich stron otoczony woksłami szczeliny, co znacznie utrudnia manualną detekcję.

Przeprowadzone eksperymenty pokazały, że PKL występują w obrazie znacznie częściej niż SKL. Przykładowo dla szczeliny zaprezentowanej na rysunku 1 wykryto 80 PKL i tylko 2 SKL, które posiadają odpowiednio 4 i 3 poprzedników. Ostatecznie w szczelinie z rysunku 1 wykryto 85 mostów. Testowany obraz miał rozmiar $220 \times 200 \times 120$ wokseli. Przetwarzanie zajęło około 2 minuty na komputerze klasy PC z procesorem Pentium 4, 1.8 GHz.

Aktualnie prowadzone są prace nad ilościowym opisem geometrii i rozmiaru mostów. Następnym krokiem będzie wyznaczenie klastków otaczających każdy most. W tym celu zostanie stworzony algorytm budujący graf klastków. Wierzchołkami tego grafu będą klastki łączące, dzielące oraz LMklastki. Gałęziami grafu będą ścieżki klastków łączące klastki wymienione w poprzednim zdaniu.

6. Wnioski

Mimo że transformata obrazu w zbiór klastków nie jest odpowiednią techniką detekcji mostów w dowolnym obrazie 3D, to okazuje się, że daje bardzo dobre rezultaty w detekcji mostów dla obrazów 3D propagacji szczeliny wywołanej pęknięciami korozyjnymi naprężeniowymi w stali nierdzewnej. Otrzymane w wyniku transformaty klastki łączące umożliwiają wykrywanie nawet bardzo małych mostów, które są bardzo trudne do wykrycia z użyciem technik manualnej analizy obrazu.

Kolejnym krokiem prowadzonych prac badawczych będzie dokładna lokalizacja mostów i ilościowa charakterystyka ich rozmiaru i kształtu. W celu realizacji tego zadania trzeba sformułować nową definicję mostu, która miałaby praktyczne znaczenie przy tworzeniu algorytmów realizujących ilościową charakterystykę mostów. Niestety analizy ilościowej parametrów mostu nie można przeprowadzić, przyjmując, iż jest on odpowiednikiem otworu, który zgodnie z definicją podaną w podrozdziale 3.1 nie jest podzbiorem przestrzeni 3D, więc nie można mówić o jego rozmiarze i kształcie.

Literatura

- [1] Babout L., Marrow T.J., Engelberg D., Withers P.J.: *X-ray microtomographic observation of intergranular stress corrosion cracking in sensitised austenitic stainless steel*. Mater. Sci. Technol., 22, 2006, 1068–1075
- [2] Borgefors G.: *Distance Transforms on Digital Images*. Computer Vision Graphics and Image Processing, 34, 1986, 344–371
- [3] Cloetens P., Pateyron-Salome M., Buffiere J.Y., Peix G., Baruchel J., Peyrin F., Schlenker M.: *Observation of microstructure and damage in materials by phase sensitive radiography and tomography*. Journal of Applied Physics, 81, 1997, 5878–5886
- [4] Ibanez L., Schroeder W., Ng L., Cates J.: *The ITK Software Guide*. Kitware, Inc. 2005
- [5] Kong T.Y.: *A digital fundamental group*. Computer Graphics, 13, 1989, 159–166
- [6] Marrow T.J., Babout L., Jivkov A.P., Wood P., Engelberg D., Stevens N., Withers P.J., Newman R.C.: *Three dimensional observations and modelling of intergranular stress corrosion cracking in austenitic stainless steel*. Journal of Nuclear Materials, 352, 2006, 62–74

- [7] Niblack C.W., Gibbons P.B., Capson D.W.: *Generating skeletons and centerlines from the distance transform*. CVGIP: Graph. Models Image Process., 54, 1992, 420–437
- [8] Scott P.M.: *Stress corrosion cracking in pressurized water reactors-interpretation, modeling and remedies*. Corrosion, 56, 2000, 771–782
- [9] Zhou Y., Toga A.W.: *Efficient skeletonization of volumetric objects*. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 5, 1999, 196–209