

KOMPUTEROWA ANALIZA OBRAZU W METALOGRAFII ILOŚCIOWEJ

J. SZALA

COMPUTER IMAGE ANALYSIS IN QUANTITATIVE METALLOGRAPHY

Abstract

The computer image analysis is performed on digital images consisting from pixels; their values, in certain scale, correspond to a mean grey level or colour of metallographic microsection area represented by a given pixel. One of the most important stage of an initial image preparation for the measurement is binarisation. Detection, usually does not confine only to the binarisation, but also comprises transformations of the grey and binary images. Review of the most important transformations available in computer image analysis applied in quantitative metallography is presented in this article. Special attention were paid to shade correction, detection of grain and twin boundaries in single-phase materials.

1. WPROWADZENIE

Przedmiotem metalografii ilościowej jest opis struktury (w artykule pojęcie to oznacza wzajemny układ elementów budowy wewnętrznej tworzyw widocznych w skali makro- i mikroskopowej) za pomocą wielkości liczbowych, ich pomiar oraz opracowanie i interpretacja wyników. Potrzeba upowszechnienia w praktyce laboratoryjnej i przemysłowej ilościowego opisu struktury była w środowisku materiałoznawczym dostrzegana od dawna. Opis ten jest niezbędny dla wyznaczenia jednoznacznych zależności w łańcuchu przyczynowo-skutkowym: skład chemiczny i technologia wytwarzania → struktura → właściwości użytkowe. Znajomość tych zależności bezpośrednio przekłada się na możliwość optymalizacji składu chemicznego i technologii wytwarzania tworzyw istnie-

jących oraz powstania całkowicie nowych materiałów.

Struktura tworzyw ma charakter trójwymiarowy. Pełna ilościowa charakterystyka struktury jest zatem możliwa tylko wtedy, gdy dysponuje się parametrami opisującymi elementy tej struktury w przestrzeni trójwymiarowej. W przypadku próbek nieprzeźroczystych dla światła, a takie dominują w materiałoznawstwie, bezpośrednie wyznaczenie tych parametrów jest niemożliwe. Podstawowym narzędziem stosowanym w badaniach wewnętrznej budowy tworzyw jest mikroskopia. Źródłem informacji o strukturze jest zatem zazwyczaj płaski zgląd metalograficzny. Najdoskonalszą obecnie metodą pozwalającą na ilościowy opis struktury w przestrzeni trójwymiarowej w oparciu o wyniki pomiarów przeprowadzonych na płaskich zglądach jest stereologia, zwana również stereometryczną metalografią ilościową.

Niejednorodność struktury obserwowana w większości materiałów inżynierskich sprawia, że niezbędne pomiary i zliczenia należy przeprowadzać na próbkach zawierających wszystkie typy struktury występujące w badanym wyrobie. W połączeniu z rosnącymi wymaganiami dotyczącymi dokładności oraz kompleksowości ilościowego opisu struktury prowadzi to do stałego zwiększania liczby mierzonych elementów struktury. Warunkom tym przy akceptowalnej pracochłonności i koszcie sprostać mogą jedynie komputerowe metody pomiaru realizowane coraz częściej za pomocą odpowiednio oprogramowanych komputerów osobistych.

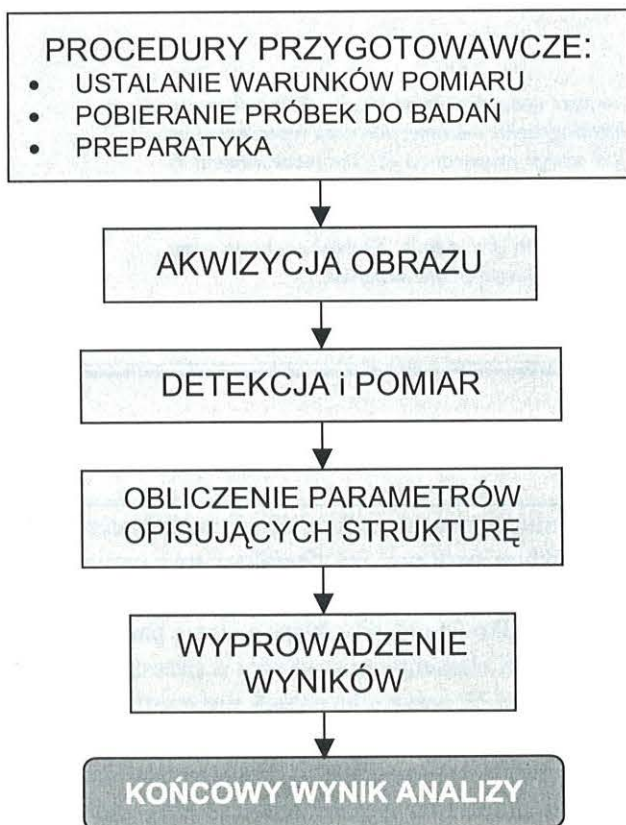
Ilościowy opis struktury, w obiegowej opinii utożsamiany często jedynie z samym aktem wyznaczenia określonych parametrów liczbowych, jest w rzeczywistości złożonym procesem pomiarowym, którego najważniejsze elementy przedstawiono na rysunku 1.

Uzyskanie dokładnego i obiektywnego ilościowego opisu struktury jest możliwe tylko wtedy, gdy zostaną poznane oraz umiejętnie wykorzystane do kształ-

tematycznych modelach zbudowanych z brył o znanej wielkości, kształcie i rozmieszczeniu, w których uwzględniono statystyczne własności struktury materiału. Każdy dowolny płaski przekrój takiej struktury jest zbiorem figur będących wiernym odwzorowaniem przecięcia płaszczyzną zglądu brył występujących w tej strukturze. Wynika z tego, że zależności stereologiczne można stosować tylko w tym przypadku, gdy mierzone elementy struktury są wiernie odwzorowane na zglądzie metalograficznym. Warunek ten wydaje się tak oczywisty, że nie został nigdzie jednoznacznie sformułowany. W oparciu o studia literaturowe oraz wieloletnie własne doświadczenia autora w zakresie ilościowego opisu struktur rzeczywistych można stwierdzić, że spełnienie tego fundamentalnego warunku stosowania stereologii jest w wielu przypadkach niezwykle trudne. Dlatego poprawna detekcja mierzonych obiektów jest centralnym problemem wszystkich metod stosowanych w metalografii ilościowej.

Końcowy obraz analizowanej struktury w mniejszym lub większym stopniu dziedziczy cechy obrazu wyjściowego zarejestrowanego za pomocą mikroskopu świetlnego lub elektronowego. Brak lub niewłaściwe odwzorowanie w tym obrazie składników strukturalnych (czyli morfologicznie jednorodnych części struktury) podlegających ocenie jest bardzo trudne lub wręcz niemożliwe do korekcji w trakcie dalszych etapów procesu pomiarowego.

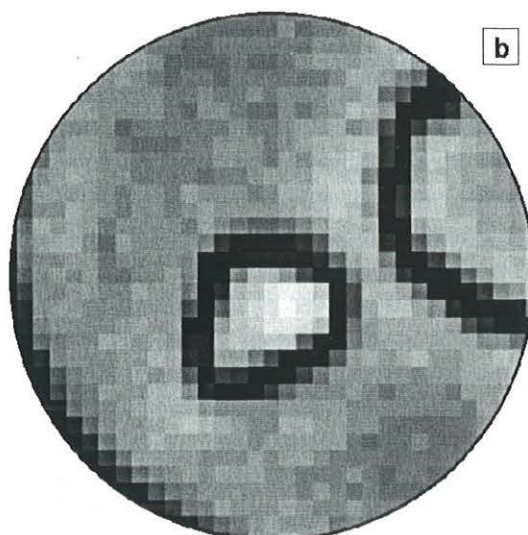
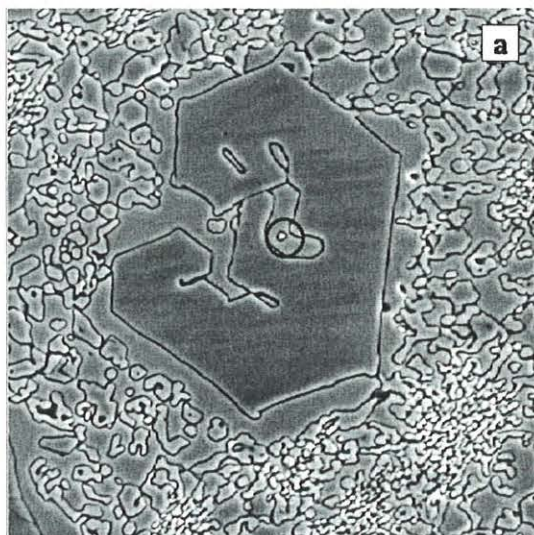
Dlatego tak ważne w metalografii ilościowej jest perfekcyjne przygotowanie zglądu metalograficznego, jego właściwe wytrawienie oraz zastosowanie odpowiedniej techniki akwizycji (pozyskiwania) obrazu. Nie chodzi przy tym o uzyskanie obrazu struktury bez rys oraz innych artefaktów. O wiele ważniejsze są działania prowadzące do takiego zróżnicowania określonych cech (zazwyczaj stopnia szarości) mierzonych obiektów oraz tła, które pozwoliłoby wyeliminować (lub przynajmniej istotnie ograniczyć) udział człowieka z procesu detekcji tych obiektów. Wynika to głównie z tego, że zadania dla komputera muszą być formułowane jednoznacznie. Brak bowiem w jego działaniach tak ważnego elementu, jakim w analizie obrazu prowadzonej przez człowieka jest wyobraźnia i intuicja. Powoduje to powolne wyodrębnianie się z preparatyki nowej gałęzi zorientowanej na potrzeby metalografii ilościowej realizowanej za pomocą metod komputerowych (Szala, 2001). Mimo to wyjściowy obraz analizowanej struktury rzadko spełnia w pełni warunki pozwalające na użycie do jej pomiaru automatycznych metod komputerowych. Najlepiej nawet przeprowadzona preparatyka nie jest w stanie wyeliminować wszystkich wad obrazu struktury, których źródła tkwią w specyfice zastosowanych w trakcie wytwarzania procesów technologicznych oraz w charakterze danej struktury.



Rysunek 1. Schemat procesu pomiarowego stosowanego w metalografii ilościowej.

towania końcowego obrazu mierzonych obiektów wszystkie te elementy procesu pomiarowego, które istotnie wpływają na wynik przeprowadzonej analizy.

Estymatory stosowane do opisu struktury w przestrzeni trójwymiarowej wyznaczone zostały w oparciu o rozważania teoretyczne prowadzone na jej ma-



Rysunek 2. Obraz wieloodcieniowy struktury staliwa wysokochromowego (a) oraz jego powiększony fragment zaznaczony czarnym okręgiem (b).

Bardzo ważnym elementem ilościowej oceny struktury są zatem procedury pozwalające na korekcję tych wad obrazu, których nie udało się usunąć w czasie preparatyki i akwizycji. Obserwowany w ostatnich latach postęp w tym zakresie wynika głównie z rozwoju komputerowych metod analizy obrazu (Wojnar i Majorek, 1994).

Komputerowa analiza obrazu jest działem informatyki stosowanej. Podstawowe przekształcenia stosowane w analizie obrazu powinny być zatem dobrze znane w środowisku informatycznym. Ponadto dostępnych jest wiele monograficznych opracowań (np. Russ, 1990, Wojnar i in., 2002) oraz stron internetowych poświęconych temu zagadnieniu.

W związku z tym w opracowaniu ograniczono się do podania jedynie tych elementarnych pojęć stosowanych w analizie obrazu, bez znajomości których treść opracowania mogłaby być mało zrozumiała. Główny nacisk położony został natomiast na metody binaryzacji obrazu szarego oraz sposoby rozwiązywania wybranych problemów pojawiających się w trakcie detekcji obiektów na obrazach struktur rzeczywistych.

2. OBRAZY WIELOODCIENIOWE (SZARE) I METODY ICH BINARYZACJI

W metodach komputerowych źródłem informacji o analizowanej strukturze jest jej obraz cyfrowy. Obraz tego typu składa się z szeregu punktów zwanych pikselami (rysunek 2).

Przekształcenie analogowego obrazu struktury (otrzymanego na wyjściu urządzenia badawczego, zazwyczaj mikroskopu) w obraz cyfrowy polega na

przyprządkowaniu każdemu pikselowi liczby, która w pewnej skali odpowiada średniemu poziomowi szarości lub barwie obszaru na zglądzie metalograficznym reprezentowanego przez ten piksel. Tak utworzone obrazy cyfrowe noszą nazwę obrazów wieloodcieniowych lub szarych.

Liczba pikseli w danym obrazie może być traktowana jako miara zdolności rozdzielczej obrazu cyfrowego; im więcej pikseli zawiera dany obraz, tym dokładniej odzwierciedla on zarejestrowaną strukturę. W metalografii ilościowej za standard przyjmuje się obecnie obrazy o wymiarach co najmniej 512x512 pikseli.

Większość obrazów struktur obserwowanych za pomocą mikroskopów świetlnych oraz wszystkie obrazy w mikroskopach elektronowych, to obrazy złożone z pikseli różniących się jedynie poziomem szarości. W metalografii zazwyczaj wykorzystuje się obrazy pozwalające na zapamiętanie 256 stopni szarości. Oznacza to, że do opisu każdego piksela używa się 8 bitów (jeden bajt). Obraz taki nazywany jest potocznie 8-bitowym. Przyjęcie takich wartości wynika ze sposobu organizacji pamięci w komputerach oraz z faktu, że ludzkie oko rozróżnia znacznie mniej poziomów szarości. Dla wiernego odtworzenia wszystkich barw występujących w przyrodzie potrzeba natomiast co najmniej 24 bitów. Takie obrazy są niezbędne przy analizie obrazów struktury ujawnionej za pomocą trawienia barwnego (Bühler i Hougardy, 1980, Radzikowska, 2000).

Piksele tworzące obraz cyfrowy zazwyczaj umieszczone są w węzłach siatki kwadratowej. Możliwe są jednak i inne rozwiązania. W pierwszym analizatorze obrazu TAS, stosującym operacje morfologiczne używana była siatka heksagonalna. Identyczne rozwiązanie przyjęto w analizatorze Morphopercolor, od wie-



lu lat pracującym w Katedrze Nauki o Materiałach Politechniki Śląskiej. Zalety i wady obydwu sposobów rozmieszczenia pikseli zostały szczegółowo omówione przez Wojnara i Majorka (1994). Obecnie w analizie obrazu dominuje siatka kwadratowa, gdyż większość procedur modyfikujących oparta jest na tej siatce. Ponadto siatka heksagonalna wymaga specjalnych rozwiązań hardware'owych.

Obrazy szare zawierają informacje o wszystkich składnikach strukturalnych zawartych w badanym tworzywie a ujawnionych na zglądzie. Często towarzyszy im szum informacyjny pochodzący od wad i artefaktów powstałych w czasie preparatyki oraz akwizycji. Przed przystąpieniem do pomiaru konieczne jest zatem wybranie spośród wszystkich pikseli obrazu tych, które należą do mierzonych obiektów. Jednym z najważniejszych etapów tego procesu zwanego detekcją jest binaryzacja, w wyniku której pikselom o poziomie szarości zawartym między tzw. dolnym i górnym progiem detekcji przypisana zostaje wartość 1, a pikselom spoza tego zakresu - wartość 0. Obraz, którego wszystkie piksele przyjmują wartość 0 lub 1, nosi nazwę obrazu binarnego.

Obraz binarny jest zazwyczaj przedstawiany w programach do analizy obrazu jako jednokolorowa nakładka na wyjściowym obrazie wieloodcieniowym. Pozwala to na analizę i ewentualną modyfikację procesu detekcji mierzonych obiektów. W niniejszym artykule, ze względów edytorskich, obrazy binarne przedstawiane będą w formie czarno-białych map bitowych. Przyjęto zasadę, że piksele o wartości 1 będą na tych obrazach czarne a o wartości 0 – białe.

Z punktu widzenia binaryzacji najlepszy obraz szary powinien się składać z dwóch zbiorów pikseli istotnie różniących się poziomem szarości. Histogram poziomów szarości takiego obrazu jest bimodalny z dwoma wyraźnymi lokalnymi maksimumami, między którymi występuje szeroki obszar o wartości zbliżo-

nej do 0. Jedno maksimum odpowiada wtedy analizowanemu elementom struktury, drugie natomiast pochodzi od tła. Dowolny próg detekcji położony w odpowiedniej odległości od maksimumów pozwala na prawidłową selekcję tych elementów. Cały proces detekcji można zaś ograniczyć do samej tylko binaryzacji.

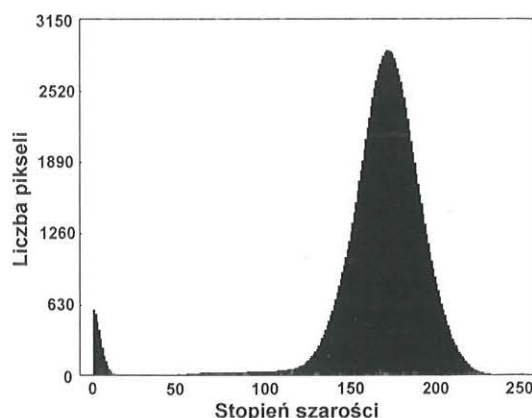
Obrazy struktur rzeczywistych mają zazwyczaj histogramy poziomów szarości znacznie różniące się od modelowego. Do nielicznych wyjątków należą wydzielenia grafitu w żeliwie szarym oraz mikropory w tworzywach po odlaniu (rysunek 3).

W metalografii ilościowej do wyznaczenia progów detekcji wykorzystuje się zazwyczaj metody manualne. Wynik binaryzacji manualnej uzależniony jest w znacznym stopniu od doświadczenia osoby prowadzącej badania. Dlatego, wszędzie tam, gdzie proces ten można zautomatyzować, powinno się skorzystać z tej możliwości.

Metody automatyczne są najbardziej efektywne, gdy histogram poziomów szarości jest bimodalny. W histogramach tego typu pomiędzy lokalnymi maksimumami położone są „doliny”, składające się z punktów, których przynależność do określonego elementu struktury nie jest jednoznaczna. W tych obszarach należy zatem poszukiwać progów detekcji dla poszczególnych składników strukturalnych. W większości metod stosowanych do wyznaczenia położenia tych progów wykorzystuje się informacje zawarte w histogramach poziomów szarości.

W zastosowaniach materiałoznawczych największe znaczenie mają:

- Metoda **minimum histogramu**, w której za progi detekcji przyjmuje się poziomy szarości lokalnych minimum (Voss i Súbe, 1991). Jest ona stosunkowo mało czuła na błąd wyboru progów, gdyż liczba pikseli w tym obszarze jest względnie mała. Z tego powodu metoda ta jest tym dokładniejsza, im wy-



Rysunek 3. Obraz mikroporów na polerowanym zglądzie próbki z żarowytrzymałego stopu niklu RENE77 oraz histogram poziomów szarości tego obrazu.

rażniejsze jest lokalne minimum. W wielu przypadkach konieczne jest wygładzanie histogramu w celu usunięcia lokalnych zaburzeń utrudniających właściwą jego interpretację. Często dla określenia progu detekcji histogram poddawany jest numerycznemu różniczkowaniu. Komplementarna analiza histogramu wyjściowego oraz jego pierwszej pochodnej pozwala na dokładniejsze ustalenie położenia progu detekcji.

- Metoda **Ridlera i Calvarda** (Ridler i Calvard, 1978) zwana również metodą k średnich (k - means). W metodzie tej histogram jest dzielony na dwa obszary złożone z pikseli o poziomie szarości odpowiednio mniejszym i większym od pewnej wartości progowej k . Wyjściowa wartość tego progu jest równa średniej arytmetycznej minimalnego i maksymalnego poziomu szarości analizowanego obrazu. Dla każdego z tych obszarów wyznacza się średnie poziomy szarości (odpowiednio g_1 i g_2), na podstawie których obliczana jest z zależności $k = (g_1 + g_2)/2$ nowa wartość progowa k . Wartość ta jest wykorzystana do ponownego podzielenia histogramu na dwa uzupełniające się obszary. Proces ten jest powtarzany z nowymi, wyznaczanymi w kolejnych pętlach pomiarowych progami k do momentu, gdy wartość progowa k przestanie się zmieniać.

Metoda **maksimum wariancji histogramu** (Otsu, 1979). W metodzie tej przyjmuje się, że poziom detekcji k dzieli histogram poziomów szarości obrazu na dwie części (klastry): analizowanych obiektów i tła. Dla każdego klastra wyznacza się jego wariancję wewnętrzną. Odjęcie sumy otrzymanych wariancji wewnętrznych od wariancji poziomów szarości w całym histogramie daje wariancję między klastrami (Guo i Pandit, 1998):

$$\sigma_B^2 = \omega_0(\mu_0 - \mu_H)^2 + (1 - \omega_0) \cdot (\mu_1 - \mu_H)^2 \quad (1)$$

gdzie:

$$\omega_0 = \sum_{i=1}^k H_i \quad \mu_0 = \frac{1}{\omega_0} \sum_{i=1}^k i \cdot H_i$$

$$\mu_1 = \frac{1}{(1 - \omega_0)} \sum_{i=k+1}^{256} i \cdot H_i \quad \mu_H = \sum_{i=1}^{256} i \cdot H_i$$

i, k – poziomy szarości,

H_i – częstość występowania pikseli o poziomie szarości i ,

Wartość wyrażenia opisanego równaniem (1) wyznaczana jest dla wszystkich poziomów szarości w analizowanym obrazie. Poziom szarości k , dla którego σ_B^2 osiąga maksimum, jest przyjmowany jako optymalny próg detekcji.

Metodę maksimum wariancji histogramu można po

niewielkich modyfikacjach przystosować do wyznaczania progów detekcji dla histogramów wielomodalnych. Przykładowo, dla histogramu z trzema lokalnymi maksimumami wartość wariancji wyznaczana jest z zależności (2):

$$\sigma_B^2 = \omega_0(\mu_0 - \mu_H)^2 + \omega_1(\mu_1 - \mu_H)^2 + \omega_2(\mu_2 - \mu_H)^2 \quad (2)$$

gdzie:

$$\omega_0 = \sum_{i=1}^k H_i \quad \omega_1 = \sum_{i=k+1}^l H_i \quad \omega_2 = \sum_{i=l+1}^{256} H_i$$

$$\mu_0 = \frac{1}{\omega_0} \sum_{i=1}^k i \cdot H_i \quad \mu_1 = \frac{1}{\omega_1} \sum_{i=k+1}^l i \cdot H_i \quad \mu_2 = \frac{1}{\omega_2} \sum_{i=l+1}^{256} i \cdot H_i$$

i, k, l – poziomy szarości,

H_i – częstość występowania pikseli o poziomie szarości i ,

Poziomy detekcji k i l , dla których wartość σ_B^2 osiąga maksimum, są poszukiwanymi progami detekcji.

- Metoda **maksimum entropii histogramu** (Kapur i in., 1985). W metodzie tej poszukiwany jest poziom detekcji k , dla którego wartość wyrażenia opisanego wzorem (3) osiąga maksimum.

$$E = -\frac{1}{\omega_0} \sum_{i=1}^k H_i \cdot \ln(H_i) - \frac{1}{1 - \omega_0} \sum_{i=k+1}^{256} H_i \cdot \ln(H_i) \quad (3)$$

Znaczenie symboli w tym wzorze objaśniono w opisie równań (1) i (2).

Oprócz metod histogramowych do automatycznego wyznaczania progów detekcji wykorzystuje się również metody oparte na ocenie zmian morfologii otrzymanego obrazu binarnego w funkcji progu detekcji. Jedną z nich jest metoda **minimum zmiany obwodu** (Russ, 1990). Korzysta się w niej z założenia, że dla prawidłowo dobranego progu detekcji leżącego między lokalnymi maksimumami kontur analizowanych obszarów jest najmniej rozwinięty.

Żadna ze znanych metod binaryzacji nie ma uniwersalnego charakteru. Progi detekcji uzyskiwane różnymi metodami mogą niejednokrotnie wyraźnie odbiegać od siebie. Zjawisko to nie ogranicza się jedynie – jak można by przypuszczać – do tzw. trudnych obrazów, gdzie ustalenie obszarów występowania poszczególnych składników strukturalnych nawet metodami manualnymi jest bardzo trudne lub niemożliwe. Podobne problemy – choć w mniejszej skali – mogą się również pojawić w trakcie analizy obrazów struktury poprawnie przygotowanych do binaryzacji. Szala (1999) stwierdził np., że próg detekcji węglików pierwotnych w odkształconej plastycznie stali szybko płynącej wyznaczony różnymi metodami wahał się od 40 do 231. Wartość najbardziej zbliżoną do poprawnej, która wynosiła 140, uzyskano za pomocą metody **maksimum wariancji histogramu**. Najgor-



sze wyniki dały natomiast metody **minimum histogramu** oraz **minimum zmiany obwodu**.

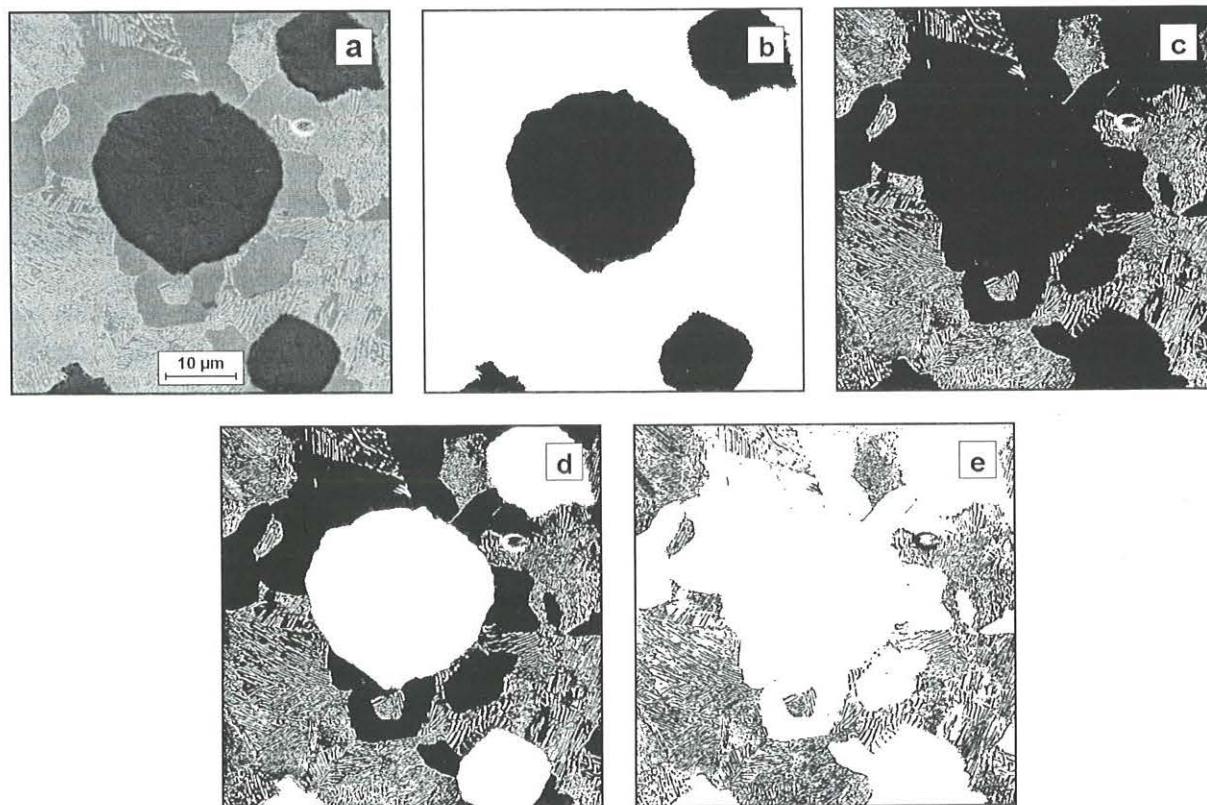
Wyniki te tylko w niewielkim stopniu pokrywają się z rezultatami, jakie uzyskano dla ścieżki kobaltowej na obrazach struktury węglika spiekane WC-Co o różnej morfologii (Szala 2001). Potwierdziło się jedynie, że i w tym przypadku bardzo dobre wyniki daje metoda **maksimum wariacji histogramu**; do najgorszych natomiast należy metoda **minimum zmiany obwodu**. Zaobserwowano również, że górny próg detekcji wyznaczony za pomocą metody **maksimum entropii** jest wyższy od progu otrzymanego pozostałymi metodami. Prawidłowość ta występuje i w innych obrazach struktur, w których dominują jasne składniki strukturalne. Umiejętne wykorzystanie tego zjawiska może w niektórych przypadkach ułatwić poprawną detekcję składników strukturalnych występujących w tworzywach wielofazowych.

Na rysunku 4a przedstawiono obraz szary struktury ferrytyczno-perlitycznego żeliwa sferoidalnego zarejestrowany za pomocą mikroskopu skaningowego. W trakcie analizy stwierdzono, że górny próg detekcji wyznaczony na podstawie metody **k średnich** oraz **maksimum wariacji** wynosi odpowiednio 69 i 68. Progi te odpowiadają maksymalnemu poziomowi szarości pikseli odtwarzających obszary zajmowane na tym obrazie przez grafit. Metody te mogą być zatem zastosowane do detekcji wydzieli grafitu (rysunek 4b). Nie można natomiast użyć do tego celu metody

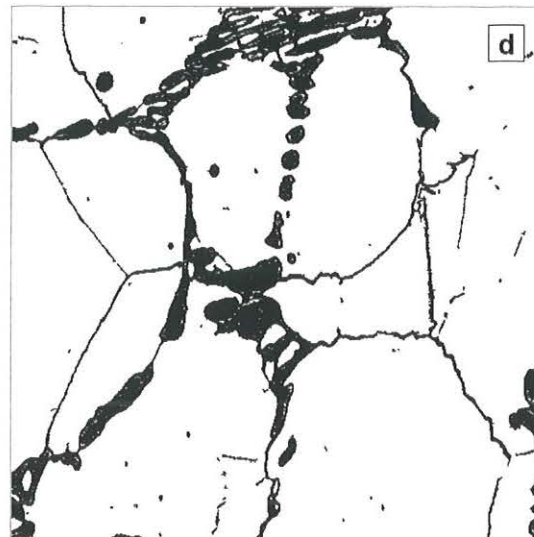
maksimum entropii (rysunek 4c). Poziom szarości niższy od wyznaczonego tą metodą, czyli górnego progu detekcji równego 119, ma bowiem nie tylko grafit, ale i płytki ferrytu. Logiczna różnica tego obrazu oraz obrazu otrzymanego za pomocą metody **maksimum wariacji** przedstawia sumaryczny obraz ziarn oraz płytek ferrytu w tym tworzywie (rysunek 4d). Negatyw obrazu otrzymanego za pomocą metody **maksimum entropii** przedstawia natomiast płytki cementytu wchodzące w skład perlitu (rysunek 4e).

Przedstawione prawidłowości nie mają wprawdzie uniwersalnego charakteru, ale mogą być pomocne w poszukiwaniu najlepszej w danych warunkach metody automatycznej binaryzacji obrazów struktur.

Interesującym narzędziem do automatycznego wyznaczania progu detekcji jest tzw. binaryzacja z histerezą (Wojnar, 1999). Na rysunku 5 przedstawiono efekt użycia tej metody do detekcji węglików oraz granic ziarn byłego austenitu w stali narzędziowej. Żadna z wcześniej przedstawionych metod binaryzacji nie pozwala na poprawne ujawnienie poszukiwanych obiektów, gdyż ich poziom szarości jest identyczny z poziomem szarości licznych punktów wewnątrz ziarn byłego austenitu. Binaryzacja z histerezą odbywa się dwuetapowo. Najpierw detekowane są te obszary obrazu wyjściowego (rysunek 5a), których poziom szarości zawarty jest w wąskim przedziale wokół lokalnego maksimum, charakterystycznego dla analizowanych obiektów. W ten sposób otrzymuje się



Rysunek 4. Idea wykorzystania dwóch różnych metod binaryzacji do detekcji składników strukturalnych występujących w tworzywach wielofazowych. Opis w tekście.



Rysunek 5. Wykorzystanie metody binaryzacji z histerezą do detekcji węglików oraz granic ziarn byłego austenitu w stali narzędziowej do pracy na gorąco. Opis w tekście.

obraz obszarów (zwanymi dalej markerami), które z całą pewnością należą do poszukiwanych obiektów (rysunek 5b). W drugim etapie ujawniane są obszary, spełniające warunki wynikające z przyjętej metody wyznaczania progu detekcji (rysunek 5c), tworzące ciągły obszar wokół wyznaczonych markerów. Dzięki temu zwiększa się prawdopodobieństwo poprawnego zaliczenia pikseli, leżących między lokalnymi maksimumami, do właściwych obiektów. Świadczy o tym zgodność finalnego obrazu binarnego poszukiwanych obiektów z ich rzeczywistą morfologią (rysunek 5d).

Przedstawione przykłady wskazują, że w niektórych przypadkach poprawny obraz binarny mierzonych obiektów można uzyskać poprzez samą binaryzację. W większości jednak przypadków detekcja nie może ograniczać się do samej binaryzacji, lecz musi być wzbogacona o dodatkowe procedury pozwalające na korekcję wad obrazu wyjściowego, których nie udało się usunąć w czasie preparatyki i akwizycji.

3. PRZEGLĄD NIEKTÓRYCH PROBLEMÓW POJAWIAJĄCYCH SIĘ W TRAKCIE DETEKCJI MIERZONYCH ELEMENTÓW STRUKTURY ORAZ METODY ICH ROZWIĄZYWANIA

3.1. Usunięcie wad i zniekształceń obrazu powstałych w trakcie preparatyki

Spełnienie zaleceń podanych w systemach eksperckich opracowanych przez czołowych producentów aparatury i materiałów stosowanych do przygotowania zglądów metalograficznych pozwala uniknąć większość typowych wad zglądów. Mimo to po wypolerowaniu może pozostać na ich powierzchni pewna liczba

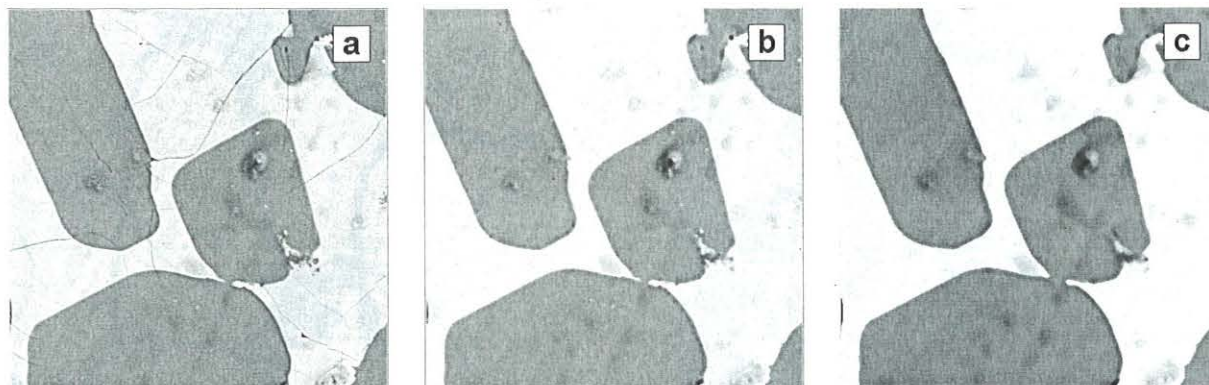
drobnych rys. Dotyczy to szczególnie dużych powierzchni zglądów, jakie są wymagane przy ocenie czystości metalurgicznej stali. W materiałach zawierających mikropęknięcia, na powierzchni zglądu występują czarne ślady ich przecięcia się z tą powierzchnią. Obecność obydwu rodzajów wad utrudnia poprawną ocenę struktury na automatycznych analizatorach obrazu.

Istnieje szereg metod minimalizacji negatywnego wpływu takich wad na proces pomiarowy (Cwajna i in., 1994). Wśród nich dominują metody oparte na analizie obrazu. Podstawowym kryterium usunięcia z obrazu wad jest ich morfologia. Artefakty na zglądzie występują zazwyczaj w postaci rys oraz wżerów. Usunięcie tych wad nie przedstawia większych problemów w przypadku materiałów wielofazowych. Pod względem kształtu i wielkości różnią się one bowiem od obszarów, należących do analizowanych elementów struktury. Gdy rysy lub pęknięcia są bardzo cienkie (rysunek 6a), dobre rezultaty daje zastosowanie przekształcenia **zamknięcie** (rysunek 6b) lub filtra **medianowego** (rysunek 6c).

Trudniejszym zagadnieniem jest eliminacja wymienionych wad z obrazów struktury materiałów jednofazowych. Dotyczy to w szczególności pęknięć, gdyż wady te pod względem morfologii są bardzo zbliżone do granic ziarn. Nieco łatwiejsze jest usuwanie rys. Jednak i tutaj każdy przypadek należy rozpatrywać indywidualnie. Przykładowo, pojedyncze rysy dłuższe niż równoległe do nich odcinki granic ziarn (rysunek 7) można usunąć stosując następującą sekwencję przekształceń:

- **kierunkowe zamknięcie** obrazu wyjściowego z krokiem zapewniającym usunięcie z obrazu wynikowego granic ziarn,
- **inwersja** otrzymanego obrazu,
- utworzenie obrazu końcowego poprzez odjęcie





Rysunek 6. Obraz wyjściowy struktury żelazokrzemu (a) oraz ten sam obraz po zastosowaniu odpowiednio: przekształcenia zamknięcie z krokiem 2 (b) oraz filtra medianowego o wymiarach 9x9 (c).

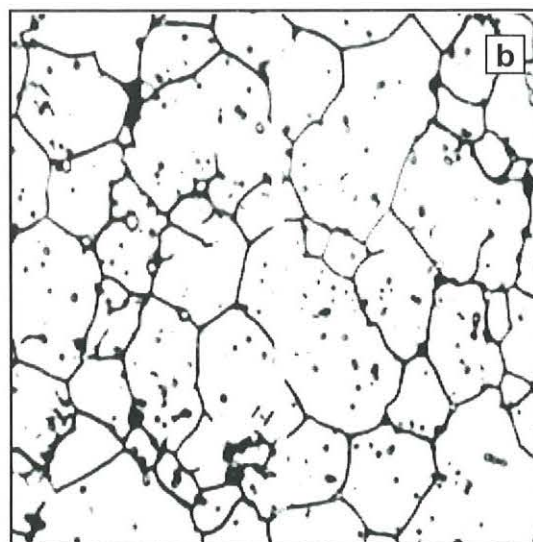
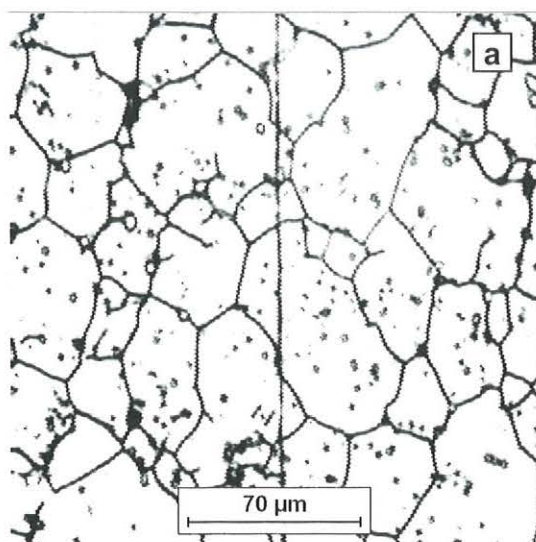
obrazu otrzymanego w wyniku poprzedniego przekształcenia od obrazu wyjściowego.

Przy eliminacji wydzieln, wżerów i wtrąceń niemetalicznych z obrazów struktury materiałów jednofazowych wykorzystuje się natomiast to, że granice ziarn tworzą po rekonstrukcji ciągłą siatkę punktów stykającą się z ramką obrazu. Do usunięcia tego typu artefaktów może być użyta procedura **pozostawienie brzegu**.

W praktyce obszar wykorzystania omówionych metod usuwania rys z obrazów struktury jest niewielki, gdyż rysy są zazwyczaj przypadkowo zorientowane na płaszczyźnie zglądu. Ich usunięcie w takim przypadku jest niezwykle skomplikowane. Brak bowiem uniwersalnych kryteriów, w oparciu o które można ten zabieg skutecznie przeprowadzić. Warunków tych nie spełnia ani poziom szarości, ani grubość rys. Ujawnione w trakcie binaryzacji granice ziarn i rysy są zazwyczaj takie same lub różnią się w niewielkim tylko stopniu (Szala, 2001).

Przy eliminacji rys pomocnym może być fakt, że są one odcinkami linii prostych. Dotyczy to szczegól-

nie tych przypadków, gdy granice ziarn nie są liniami prostymi, a długość rys jest większa od średnicy ziarna (w artykule jest to średnica koła równoważnego). Wykorzystanie w praktyce tego kryterium wymaga opracowania procedury pozwalającej na szybkie znajdowanie w analizowanym obrazie odcinków linii prostej. Klasyczny obraz binarny jest mało przydatny do tego celu. Przez każdy piksel przechodzić może bowiem nieskończenie wiele prostych. Aby stwierdzić, czy któraś z tych prostych rzeczywiście występuje w analizowanym obrazie, należy sprawdzić, czy jej równanie spełniają także inne piksele na obrazie. Czynność tę trzeba powtórzyć dla wszystkich pikseli obrazu i wszystkich teoretycznie występujących w nim linii prostych. Cały proces obliczeniowy jest zatem bardzo czasochłonny, a uzyskane rezultaty często są niezadowolające. Dlatego w praktyce do ujawniania linii prostych (oraz innych obiektów o określonych kształtach) wykorzystuje się tzw. technikę Hougha (Immerkar, 1998). Metoda ta jest szczególnie przydatna przy analizie zdjęć lotniczych i satelitarnych do identyfikacji budynków, mostów, dróg itp. (Fitton, 1998).



Rysunek 7. Usuwanie pojedynczych, długich rys z obrazu struktury stali SW7M w stanie zahartowanym.

Można ją jednak również wykorzystać w metalografii ilościowej.

W metodzie Hougha wyjściowy obraz binarny przekształcony zostaje z przestrzeni kartezjańskiej do biegunowej przestrzeni Hougha. W przestrzeni tej wszystkie proste przechodzące przez punkt o współrzędnych (x,y) opisuje krzywa dana równaniem:

$$\rho = x \cdot \cos \Theta + y \cdot \sin \Theta \quad (4)$$

Współrzędne (θ, ρ) punktu przecięcia się krzywych otrzymanych dla dwóch różnych pęków prostych opisują prostą należącą do obydwu pęków (rysunek 8a). Im więcej pikseli leży na prostej, tym więcej krzywych przecina się w tym punkcie (rysunek 8b).

Wyznaczenie współrzędnych punktu przecięcia się kilku krzywych nie przedstawia żadnego problemu. Można tego dokonać nawet metodami rachunkowymi. W przypadku struktur rzeczywistych (rysunek 9a), gdy liczba tych krzywych wynosi kilkaset lub kilka tysięcy (odpowiada ona liczbie pikseli na analizowanym obrazie binarnym), rozwiązanie tego zadania metodami rachunkowymi jest praktycznie niemożliwe.

Dlatego w metodzie Hougha krzywe otrzymane dla kolejnych punktów wyjściowego kartezjańskiego obrazu binarnego (rysunek 9b) zostają zdigitalizowane, a powstałe w wyniku tego procesu segmenty z przedziału $(\theta \pm d\theta, \rho \pm d\rho)$ są akumulowane w komórkach o współrzędnych (θ, ρ) specjalnie utworzonej do tego celu macierzy dwuwymiarowej. Otrzymuje się w ten sposób obraz wieloodcieniowy (rysunek 9c), w którym poziom szarości każdego piksela o współrzędnych (θ, ρ) jest w pewnej skali prawdopodobieństwem wystąpienia w wyjściowym obrazie binarnym linii prostych o równaniach opisanych wzorem (4). Ujawnienie tych linii sprowadza się zatem do detekcji punktów w przestrzeni Hougha, których poziom szarości spełnia określone warunki. Jest to najtrudniejszy ele-

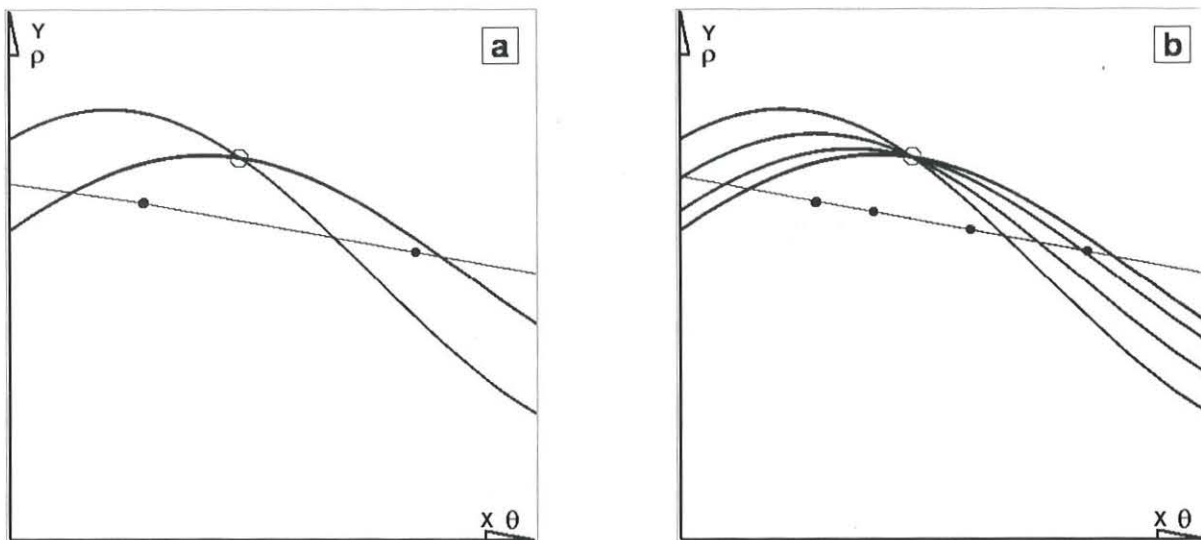
ment całej procedury. Do detekcji tych punktów zazwyczaj wykorzystuje się klasyczne metody binaryzacji automatycznej. Wydetekowane punkty w przestrzeni Hougha (rysunek 9d) są następnie transformowane na odpowiadające im linie proste w układzie kartezjańskim (rysunek 9e). Różnica wyjściowego obrazu binarnego oraz wydetekowanych linii daje obraz struktury bez rys (rysunek 9f).

Z powyższego przykładu wynika, że metoda ta może być skuteczna nawet wtedy, gdy na analizowanym obrazie oprócz rys występują także inne artefakty. Skuteczność ta jednak wyraźnie maleje ze zmniejszaniem się długości rys, gdyż wartości pikseli reprezentujących w przestrzeni Hougha rysy oraz dłuższe prostoliniowe odcinki granic ziarn nie wykazują istotnych różnic. Ponieważ jednak rysy tego typu różnią się od granic ziarn poziomem szarości lub/i grubością, to do ich usunięcia można zastosować uprzednio omówioną metodę opartą na przekształceniu „otwarciu”.

3.2. Korekcja cienia

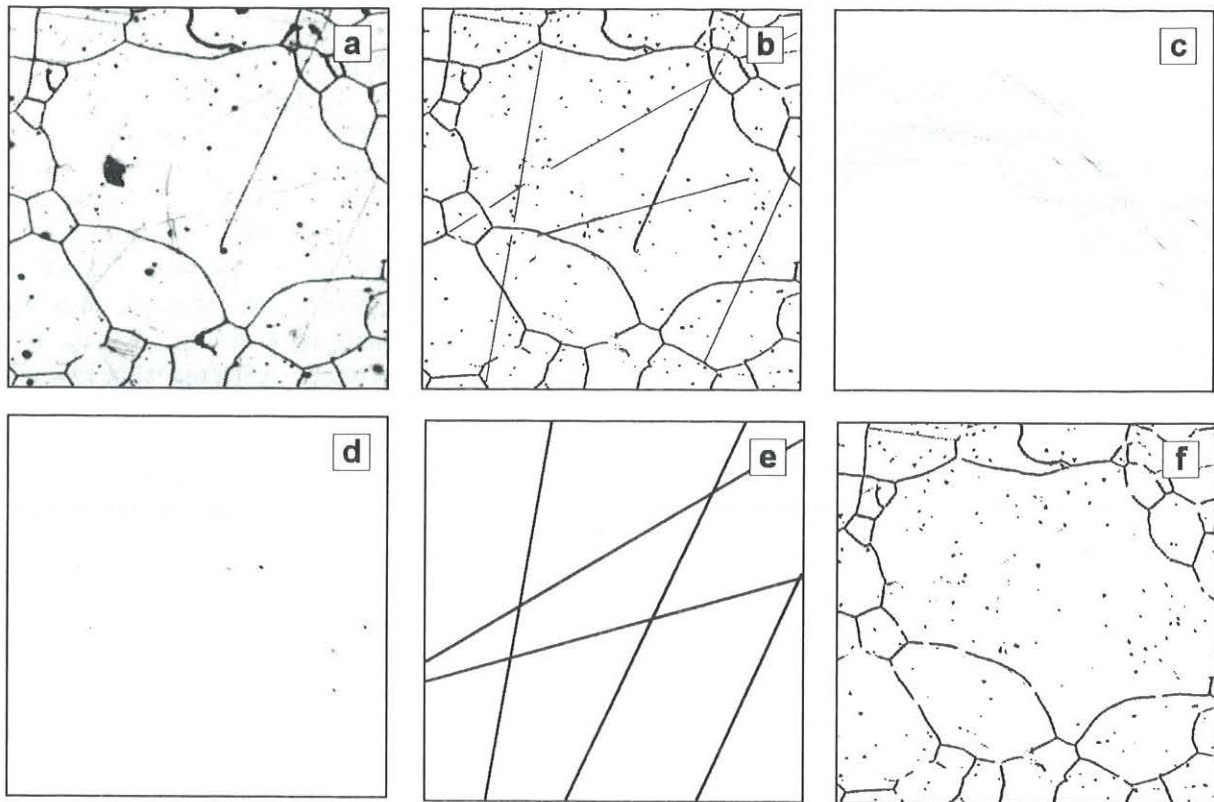
Nierównomierne oświetlenie całej powierzchni zglądu obserwowanej pod mikroskopem, nazywane w analizie obrazu zjawiskiem cienia, jest najczęstszą wadą obrazu struktury, jaka może powstać w trakcie jego akwizycji. Wada ta, o ile nie jest zbyt wyraźna, nie utrudnia zazwyczaj poprawnego jakościowego opisu analizowanej struktury (rysunek 10a). Natomiast prawidłowa detekcja granic (niezbędna przy ocenie wielkości ziarna) może być utrudniona (rysunek 10b).

Usunięcie, lub zminimalizowanie tego niekorzystnego zjawiska powinno być jedną z pierwszych operacji prowadzonych na zarejestrowanym obrazie szarym.



Rysunek 8. Krzywe reprezentujące w przestrzeni Hougha wszystkie proste przechodzące przez zaznaczone punkty.





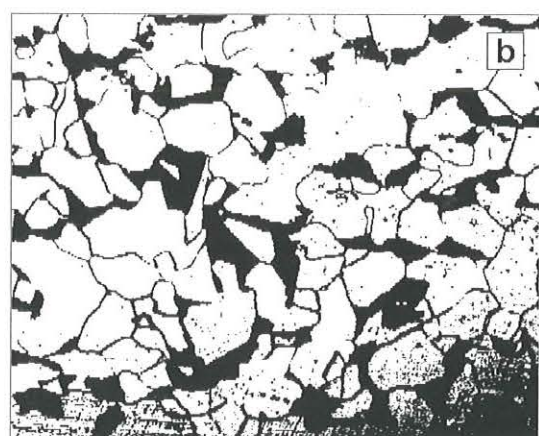
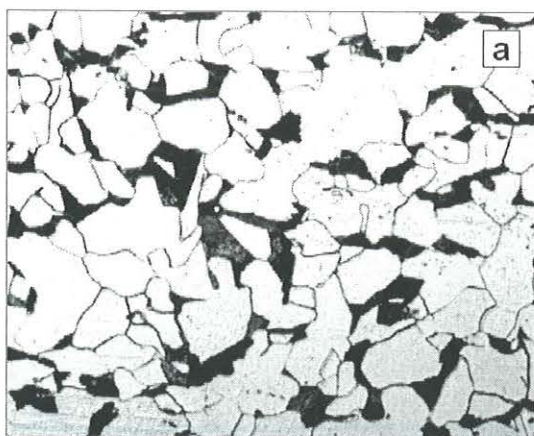
Rysunek 9. Wykorzystanie metody Hougha do detekcji i usuwania rys z obrazu struktury stali austenitycznej. Opis w tekście.

Metody korekcji cienia można podzielić na dwie grupy:

- **metody statyczne**, w których usunięcie cienia wymaga zarejestrowania obrazu źródła światła odbitego od lustrzanej powierzchni. Zróżnicowanie stopni szarości występujące na takim obrazie świadczy o obecności cienia. Suma negatywu tego obrazu oraz obrazu wyjściowego daje obraz końcowy pozbawiony cienia. Istotną wadą statycznych metod korekcji cienia jest konieczność ponownego rejestrowania obrazu cienia przy każdej zmianie warunków pracy, np. obiektywu, filtra lub natężenia światła. Komplikuje to znacznie i wydłuża analizę. Z tego powodu metoda statyczna może być efektywnym narzędziem korekcji cienia jedynie w

wielkoseryjnych badaniach rutynowych próbek o podobnej mikrostrukturze.

- **metody dynamiczne** oparte są na założeniu, że każdy zarejestrowany obraz struktury złożony jest z dwóch elementów: właściwej struktury oraz cienia. Metody należące do tej grupy różnią się jedynie szczegółowymi rozwiązaniami dotyczącymi sposobu wyodrębnienia z tego obrazu obszarów objętych cieniem. Lokalne zmiany poziomu szarości wywołane przez cień są stosunkowo niewielkie. Dlatego przynależność danego piksela do cienia może być stwierdzona jedynie na podstawie globalnej analizy całego obrazu. Istotne zróżnicowanie poziomów szarości o charakterze lokalnym świadczy o występowaniu w tym miejscu granic



Rysunek 10. Szary (a) i binarny (b) obraz struktury stali ferrytyczno-perlitycznej zawierającej cień.

między różnymi elementami struktury. W związku z tym dla wyodrębnienia obszarów objętych cieniem bardzo przydatne są metody oparte na przekształceniach nieliniowych. Przekształcenia te silnie tłumią lokalne zmiany stopnia szarości nie wpływając równocześnie na zmiany o charakterze globalnym.

W materiałach jednofazowych obraz cienia można uzyskać poprzez zastosowanie przekształcenia „zamknięcie” z krokiem większym od grubości granic ziarn występujących w obrazie wyjściowym. Różnica obrazu wyjściowego oraz negatywu tak otrzymanego obrazu cienia daje obraz bez tej wady. Metoda ta jest bardzo skuteczna w przypadku detekcji obiektów, których poziom szarości jest bliski najjaśniejszym punktom obrazu. Korekcja cienia w najciemniejszych obszarach obrazu obarczona jest natomiast błędem systematycznym powodującym zróżnicowanie poziomów szarości występujących w nich pikseli. Aby wyeliminować to niekorzystne zjawisko należy najpierw zbudować obraz pośredni będący ilorazem obrazu idealnie białego oraz obrazu cienia otrzymanego za pomocą przekształcenia „zamknięcie”. Iloczyn obrazów: pośredniego i wyjściowego daje końcowy obraz analizowanej struktury bez cienia.

Skuteczność usuwania cienia za pomocą obydwóch wymienionych metod wyraźnie maleje, gdy na obrazie występują obiekty o znacznych rozmiarach. W takim przypadku lepsze efekty daje tzw. **metoda funkcyjna** (Szala, 1998). W metodzie tej obraz wyjściowy jest aproksymowany funkcją kwadratową współrzędnych x i y jego pikseli. Funkcja ta prawidłowo odzwierciedla zróżnicowanie obrazu o charakterze globalnym i równocześnie nie ujawnia lokalnych zmian stopnia szarości związanych z obecnością elementów struktury. Porównanie skuteczności tej metody oraz metody opartej na przekształceniu „zamknięcie” przedstawiono na rysunku 11.

Granice ziarn ferrytu można dokładniej wydetekować

na obrazie, w którym cień został usunięty za pomocą metody funkcyjnej (rysunek 11a). Również pod względem szybkości metoda ta jest w tym przypadku lepsza od metod opartych na przekształceniach nieliniowych. Zalety metody funkcyjnej stają się mniej wyraźne, gdy maleje wielkość mierzonych obiektów. Tym należy tłumaczyć powszechne stosowanie do korekcji cienia w obrazach struktur jednofazowych metod opartych na przekształceniach nieliniowych.

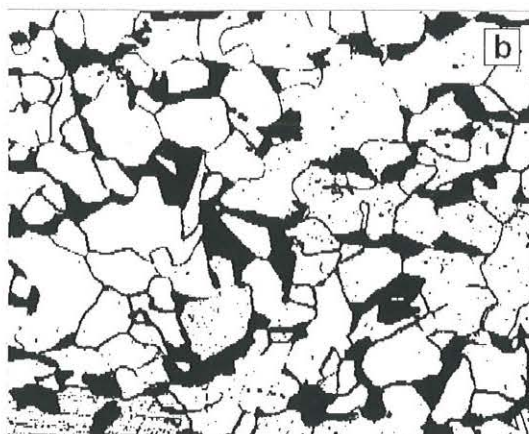
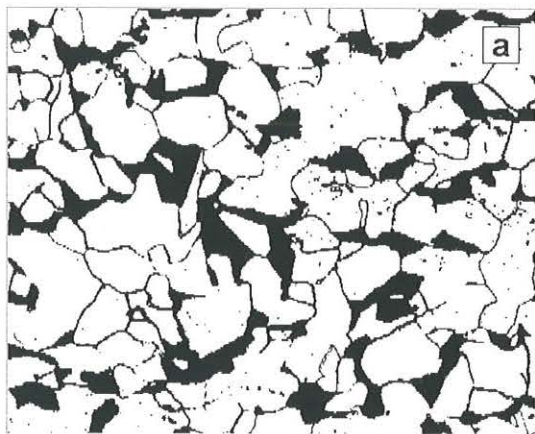
3.3. Detekcja granic ziarn

Problem detekcji granic dotyczy różnych elementów strukturalnych występujących zarówno w materiałach jedno-, jak i wielofazowych. Największe trudności powstają w trakcie detekcji granic między ziarnami tej samej fazy, gdyż występować mogą na nich liczne nieciągłości (przerwy). Granice międzyfazowe oddzielające obszary znacznie różniące się składem chemicznym trawią się zazwyczaj bardzo intensywnie. Uzyskanie poprawnego obrazu binarnego tych granic jest zatem stosunkowo proste.

Złożoność procedur stosowanych do rekonstrukcji granic ziarn uzależniona jest od jakości wyjściowego obrazu binarnego. Gdy nieciągłości na granicach ziarn są znacznie mniejsze od średnicy ziarna, dobre efekty daje przekształcenie **zamknięcie** z krokiem większym od najdłuższej nieciągłości.

Zaletą tej metody jest jej prostota oraz to, że jest dostępna w każdym programie do analizy obrazu. Jest ona jednak mało skuteczna, gdy nieciągłości granic są znaczne. Wtedy zanikać mogą ziarna, których średnica jest mniejsza od tych nieciągłości (Szala, 1998).

W takich sytuacjach konieczne jest stosowanie bardziej złożonych procedur opartych na przekształceniach generujących linie podziału między obiektami. Należy do nich przekształcenie **SKIZ** (skrót od angielskiej nazwy: **skeleton by influence zone**), które pozwala na wyznaczenie linii granicznej powstałej w



Rysunek 11. Granice ziarn ferrytu i obszary perlitu wydetekowane na obrazach uzyskanych po przekształceniu obrazu struktury przedstawionej na rysunku 10a za pomocą funkcyjnej (a) oraz opartej na zamknięciu (b) metody usuwania cienia.



miejscu zetknięcia się rosnących markerów różnych obiektów.

Poprawna rekonstrukcja granic ziarn za pomocą tego przekształcenia jest możliwa jedynie wtedy, gdy spełnione są dwa warunki:

- każde ziarno jest reprezentowane przez dokładnie jeden marker,
- ziarna i ich markery nie różnią się istotnie pod względem wymiarów i kształtu.

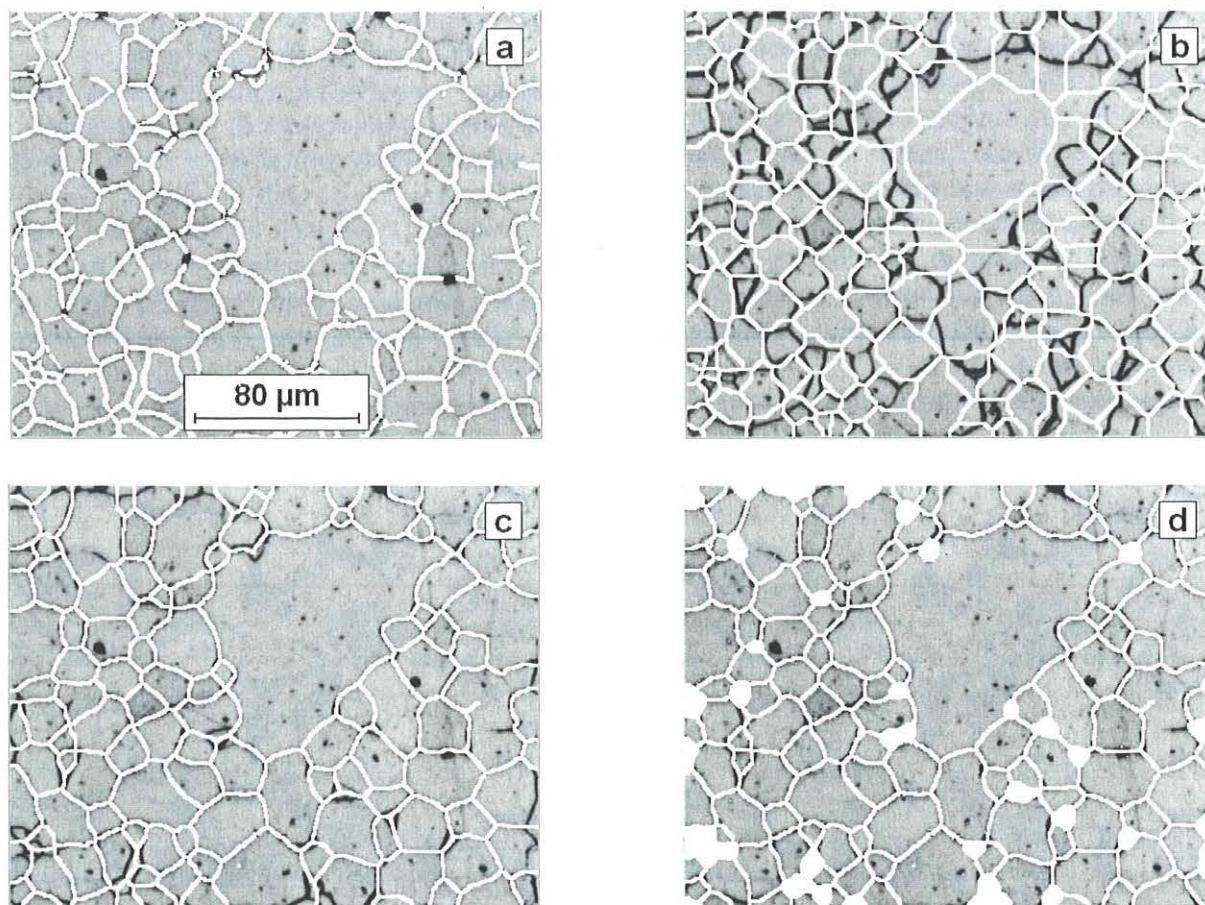
Zazwyczaj stosuje się trzy metody generowania markerów: **erozja warunkowa**, erozja z określonym krokiem oraz złożenie tych dwóch przekształceń (rysunek 12).

Białe linie na tym rysunku odwzorowują na tle obrazu szarego struktury stali węglowej wyjściowy obraz binarny granic ziarn ferrytu (a) oraz granice zrekonstruowane za pomocą przekształcenia **SKIZ** z użyciem markerów wygenerowanych według tych metod (b-d). Uzyskane obrazy świadczą o tym, że najlepszą zgodność liczby ziarn i ich markerów zapewnia suma obrazów uzyskanych w wyniku **erozji** z krokiem 5 oraz **erozji warunkowej** (rysunek 12d). W tym przypadku wszystkie nie ujawnione na rysunku 12c ziarna (na rysunku 12d zaznaczono je kolorem białym) zostają poprawnie zrekonstruowane.

Obraz linii podziału uzyskany w przekształceniu

SKIZ jest wypadkową wielkości, kształtu oraz rozmieszczenia markerów. Podobieństwo morfologiczne obiektów i ich markerów maleje ze wzrostem kroku **erozji**. Linie podziału mogą się zatem pokrywać z granicami ziarn tylko wtedy, gdy nieciągłości tych granic są niewielkie. Do rekonstrukcji granic znacznie zdefektowanych konieczne jest użycie procedur w większym stopniu uwzględniających w obrazie wynikowym wyjściowy obraz ziarn. Warunki te spełnia procedura **działy wodne** (Serra i Vincent, 1989).

Przekształcenie to realizowane jest na obrazie szarym otrzymanym z wyjściowego obrazu binarnego (rysunek 13a) za pomocą tzw. **funkcji odległości**. Pikselom tego obrazu przypisuje się liczby będące różnicą między maksymalnym dla danego obrazu szarego poziomem szarości (zazwyczaj 255) i odległością (w punktach obrazu) tych pikseli od konturu obiektów wyjściowego obrazu binarnego (rysunek 13b). Przyjmuje się, że odległość ta dla pikseli ujawnionych na obrazie binarnym jest równa 0. Lokalne minima w tak otrzymanym obrazie są markerami rekonstruowanych obiektów. Binaryzacja z coraz wyższym górnym progiem detekcji ujawnia kolejne lokalne minima oraz poszerza już ujawnione (rysunek 13c-d). W miejscach ich zetknięcia powstają linie oddzielające rosnące obszary (rysunek 13e). Suma tych linii oraz wyjściowe-



Rysunek 12. Zastosowanie SKIZ do rekonstrukcji granic ziarn ferrytu (a) na obrazie struktury stali węglowej. Opis rysunków w tekście.

go obrazu binarnego ujawnia wszystkie granice występujące na tym obrazie (rysunek 13f).

Dokładność odtworzenia granic ziarn za pomocą metody **działów wodnych** zdeterminowana jest jedynie przez liczbę i położenie markerów rekonstruowanych ziarn. Nie zależy ona natomiast od wielkości i kształtu markerów.

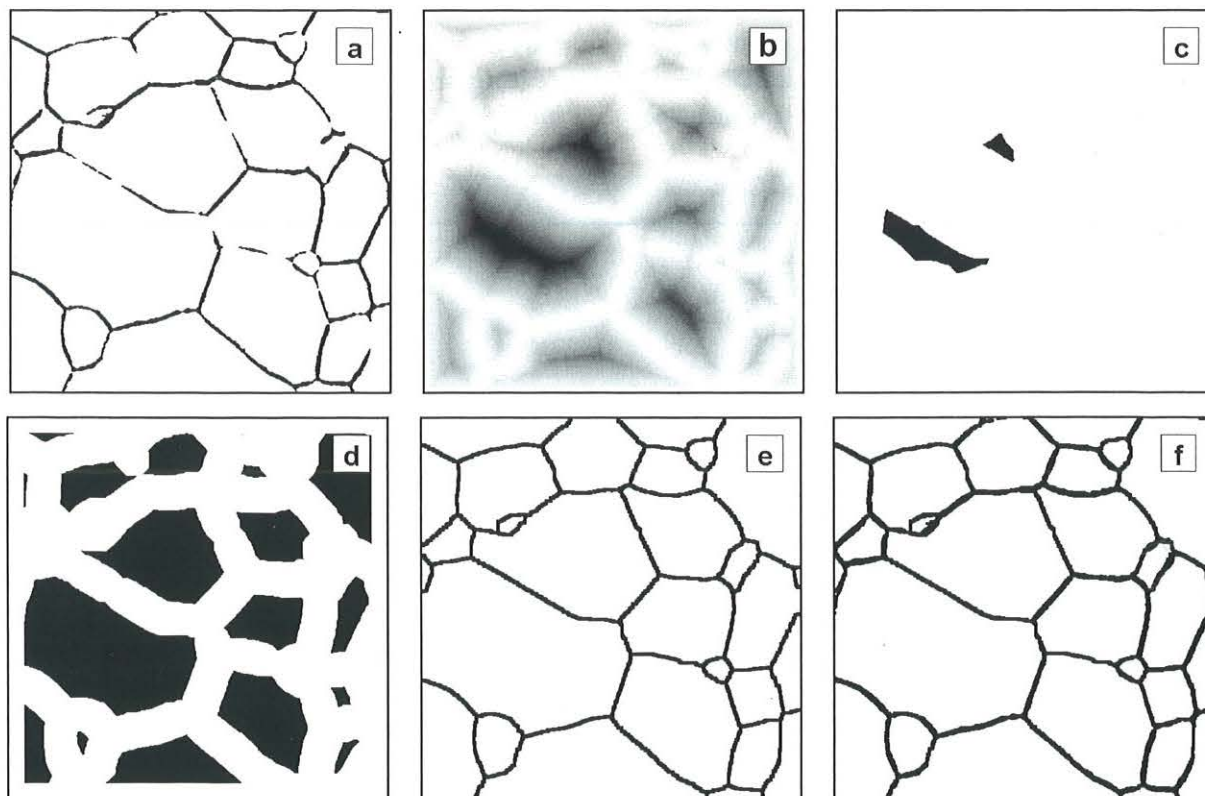
Szczególnego znaczenia nabierają zatem działania doskonalące proces generowania markerów, tak by każdemu potencjalnemu obiektowi odpowiadał dokładnie jeden marker. Pojawianie się w obrazach granic ziarn rekonstruowanych przy użyciu metody **działów wodnych** dodatkowych granic w miejscach, gdzie ich w rzeczywistości nie ma, świadczy o tym, że przyjęcie lokalnych minimów jako markerów rekonstruowanych obiektów nie zawsze jest uzasadnione. Niewielkie nierówności na krawędziach wydetekowanych obiektów mogą bowiem generować dodatkowe minima w obrazie **funkcji odległości**.

Podobne problemy występują w przypadku **erozji warunkowej** wykorzystywanej standardowo do ujawniania markerów w opartej na idei działów wodnych procedurze zwanej **segmentacją**. Szala (2001) stwierdził, że nadmiarowe markery pojawiające się w obrazie uzyskanym w wyniku **erozji warunkowej** są generowane przez te fragmenty obiektu powstałe w momencie jego podziału, których wymiary nie przekraczają kilku pikseli (rysunek 14). Wprowadzenie do standardowej **segmentacji** dodatkowego przekształ-

cenia eliminującego z obrazu te fragmenty pozwala na uzyskanie bardziej poprawnego obrazu markerów (rysunek 14c), a co za tym idzie - zwiększa skuteczność rozdzielania „sklejonych” elementów struktury oraz rekonstrukcji granic ziarn. Metoda ta została nazwana przez jej autora **segmentacją kontrolowaną**.

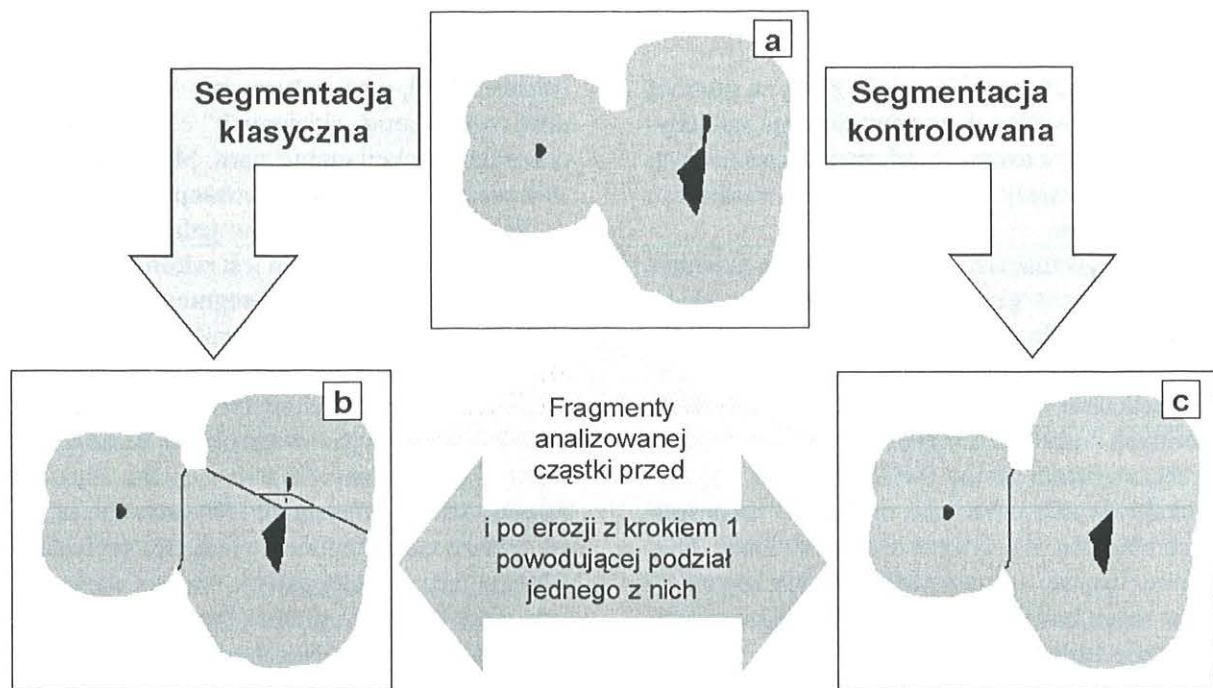
W przypadku materiałów jednofazowych również skutecznym rozwiązaniem jest **rekonstrukcja warunkowa** oparta na klasycznej **segmentacji**, w której dodatkowo uwzględniono warunki, jakie spełniać muszą granice ziarn w materiałach jednofazowych. Pierwszym etapem **rekonstrukcji warunkowej** jest **szkieletyzacja** wyjściowego obrazu binarnego odtwarzanych granic (białe linie na rysunku 15a). Z otrzymanego szkieletu (rysunek 15b) usuwane są segmenty krótsze od założonej wielkości (rysunek 15c). Występujące na otrzymanym obrazie ziarna zawierające niedokończone granice (rysunek 15d) poddane zostają **segmentacji**. Negatyw obrazu będącego sumą tych ziarn po **segmentacji** oraz ziarn, które nie były modyfikowane, daje obraz złożony z linii, z których większość (lub w niektórych przypadkach wszystkie) ma przebieg zgodny z poszukiwanymi granicami (rysunek 15e). W celu wyeliminowania linii nie będących granicami ziarn, w obrazie końcowym pozostają tylko te linie (rysunek 15f), które mają punkty wspólne z nie zamkniętymi segmentami szkieletu z rysunku 15c.

W atlasie przekształceń opracowanym przez Szalę



Rysunek 13. Idea przekształcenia działów wodnych. Opis w tekście.





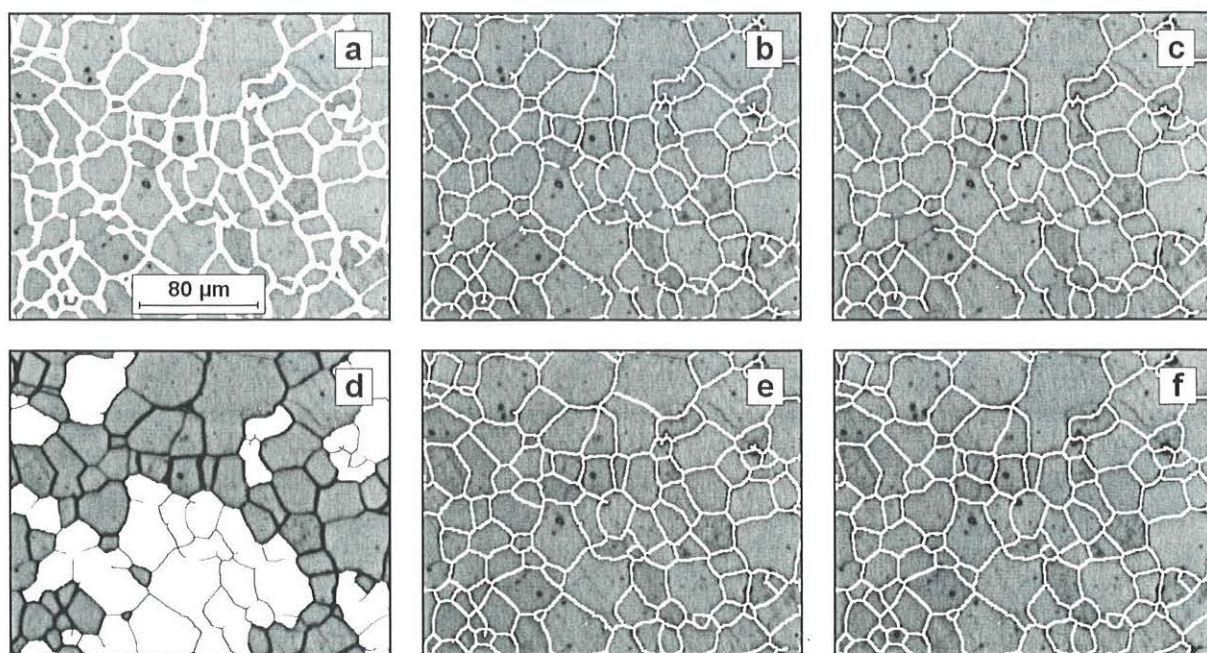
Rysunek 14. Idea segmentacji kontrolowanej. Opis w tekście.

(2001) oraz Wojnara i in. (2002) wykazano, że **rekonstrukcja warunkowa** stanowi efektywne narzędzie do detekcji granic ziarn w obrazach struktur tworzyw jedno- i wielofazowych ocenianych ilościowo.

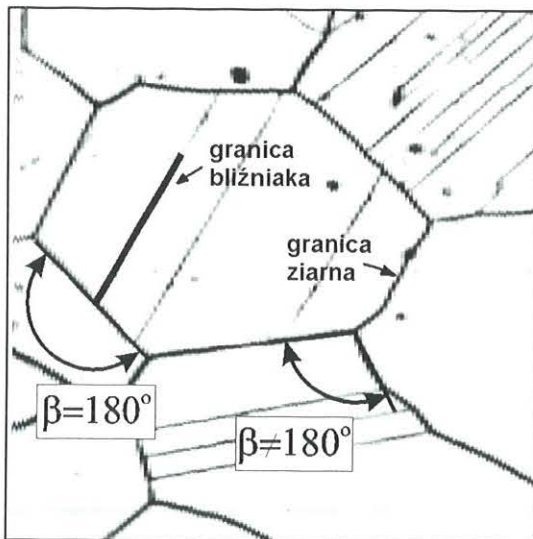
W niektórych tworzywach jednofazowych (np. w stalach austenitycznych) granicom ziarn towarzyszą granice bliźniaków. Odmienne właściwości tych granic powodują, że powinny być one mierzone oddzielnie. Szala i Roskosz (1997) stwierdzili, że granice ziarn zazwyczaj nie zmieniają lub zmieniają tylko w niewielkim stopniu swój przebieg w punkcie potrójnym, w którym stykają się z granicą bliźniaka (rysunek 16).

Oznacza to, że jeżeli kąt β , jaki tworzą ze sobą dwie dowolne granice przecinające się w punkcie potrójnym, zbliżony jest do 180° , to trzecia granica wychodząca z tego punktu jest granicą bliźniaczą. Gdy warunek ten nie jest spełniony – linie wychodzące z jednego punktu potrójnego są granicami ziarn. Na podstawie wielkości kąta β można zatem odróżnić granice ziarn od granic bliźniaków.

W trakcie testowania skuteczności omawianej metody na austenitycznych stalach Cr-Mn stwierdzono, że najlepsze rezultaty można uzyskać, gdy za granice bliźniacze uzna się te, dla których kąt β zawarty jest w



Rysunek 15. Rekonstrukcja granic ziarn za pomocą metody **rekonstrukcji warunkowej**. Opis w tekście.



Rysunek 16. Schemat wyjaśniający detekcję granic bliźniaków na podstawie wielkości kąta β .

granicach 150-200o (Szala i Roskosz, 1997). Przyjęcie tych warunków pozwala na poprawną detekcję około 85% granic bliźniaków i 70% granic ziarn.

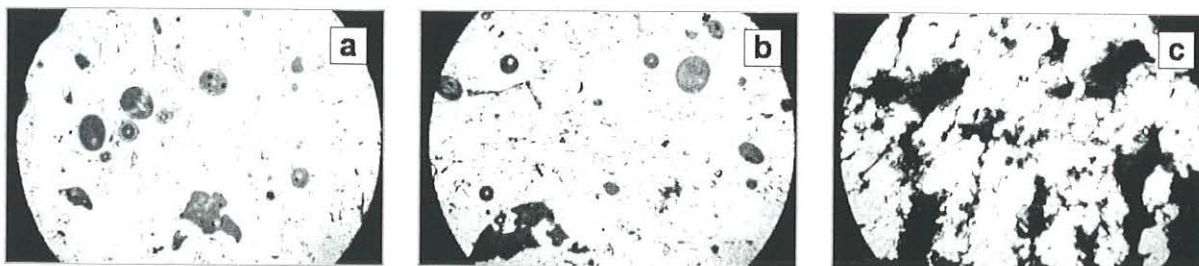
Dla stwierdzenia, czy przedstawiony przedział wartości kąta β ma charakter uniwersalny konieczne

jest przeprowadzenie dalszych badań dla innych grup tworzyw zawierających bliźniaki.

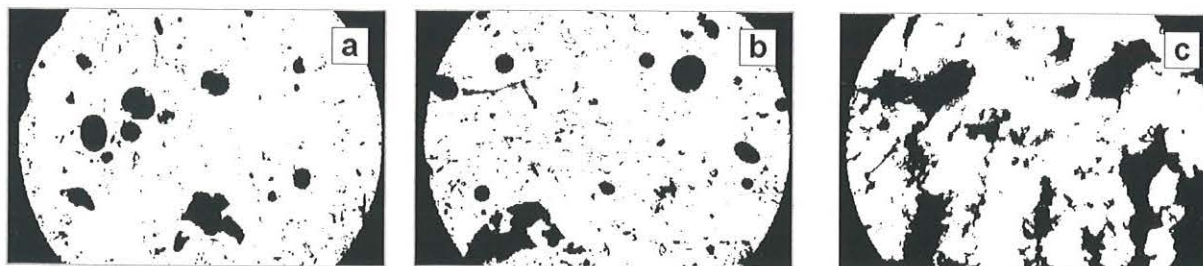
Bardzo nietypowy problem pojawił się w trakcie wyznaczania udziału objętościowego porów występujących w próbkach spieków przedstawionych na rysunku 17.

Zgodnie z podstawowym równaniem stereologii (Ryś, 1995) jednym z estymatorów udziału objętościowego jest udział powierzchniowy. Aby go wyznaczyć, trzeba zmierzyć pole powierzchni zajmowanej przez opisywane obiekty (w tym przypadku są nimi pory) oraz pole obszaru analizy. Zazwyczaj obszar analizy odpowiada zastosowanej ramce pomiarowej.

W rozpatrywanym przypadku jest on jednak ograniczony do fragmentu próbki widocznej na zarejestrowanym obrazie. Proces detekcji należy zatem przeprowadzić zarówno dla mierzonych porów, jak i obszarów analizy. Pory występujące w badanych próbkach mają poziom szarości istotnie niższy od poziomu szarości tworzywa próbki. Binarzacja obrazów wyjściowych nie pozwala jednak na poprawną ich detekcję, gdyż podobny poziom szarości wykazują obszary obrazu leżące poza próbkami (rysunek 18).



Rysunek 17. Obrazy szare analizowanych próbek.



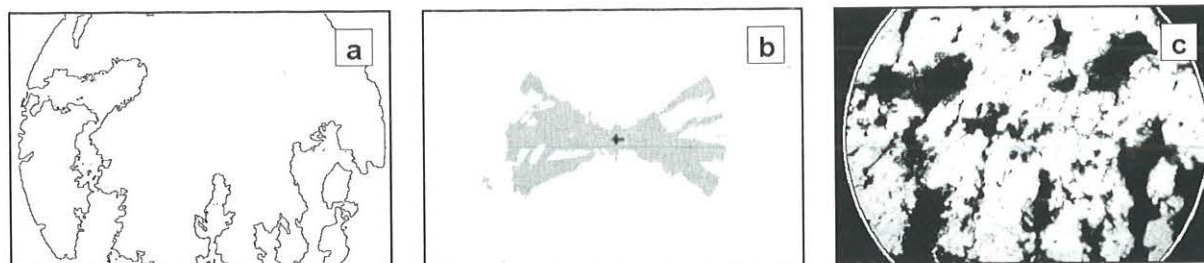
Rysunek 18. Obrazy binarne porów uzyskane za pomocą binaryzacji obrazów próbek przedstawionych na rysunku 17.



Rysunek 19. Obrazy binarne obszarów zajmowanych przez badane próbki uzyskane za pomocą metody I.



Rysunek 20. Obrazy binarne porów uzyskane za pomocą metody I.



Rysunek 21. Obrazy uzyskane na kolejnych etapach procesu detekcji brzegu badanych próbek. Opis w tekście.



Rysunek 22. Końcowe obrazy binarne porów uzyskane za pomocą metody II. Opis w tekście.

Usunięcie z tych obrazów pikseli leżących poza badaną próbką jest możliwe, gdy znane są granice obszaru analizy. W przypadku, gdy pory nie wychodzą na powierzchnię próbki lub gdy zdarza się to sporadycznie, za obszar analizy można uznać obraz binarny próbki poddany procedurze **wypełnianie otworów** (rysunek 19a). Metodę tę oznaczmy symbolem I. Wzrost liczby porów otwartych prowadzi do pogorszenia zgodności tak uzyskanego obrazu z oczekiwanym wyglądem poszukiwanego obszaru analizy (rysunek 19b). Gdy w próbce dominuje porowatość otwarta, metoda ta całkowicie zawodzi (rysunek 19c).

Metoda I pozwala zatem na w miarę poprawną detekcję porów jedynie w próbce przedstawionej na rysunku 17a. W pozostałych przypadkach wiele porów nie zostaje ujawnionych (rysunek 20).

Znacznie bardziej uniwersalna jest metoda oznaczona umownie symbolem II, w której uwzględnia się to, że brzeg analizowanych próbek jest fragmentem okręgu. Najważniejszym elementem tej metody jest przekształcenie **okrąg**, za pomocą którego można detekować obiekty w kształcie koła lub jego fragmentu.

W przekształceniu tym przyjęto, że każdy piksel analizowanego obrazu binarnego może należeć do nieskończenie wielu okręgów, których promienie leżą w pewnym, zadeklarowanym na początku analizy, przedziale wartości. Informacje o współrzędnych środków tych okręgów oraz ich promieniach zapisywane są, podobnie jak w przypadku omówionej w poprzednim rozdziale metody Hougha, w specjalnej macierzy o wymiarach zgodnych z wymiarami analizowanego obrazu. Im więcej pikseli należy do danego okręgu, tym większa jest wartość elementu macierzy odpowiadającego środkowi tego okręgu. Gdy wartość ta jest większa od uzyskanej dla okręgów o mniejszym promieniu, dotychczasowa wartość promienia przypisana danemu elementowi macierzy zostaje zastąpiona przez nową. Wyznaczenie położenia lokalnych ekstremów w tej macierzy pozwala zatem na ujawnienie okręgów występujących w wyjściowym obrazie binarnym.

Aby zastosować omawianą metodę do detekcji brzegów analizowanych próbek trzeba najpierw wyznaczyć kontury obrazów z rysunku 19 oraz usunąć te jego fragmenty, które pokrywają się z bokami ramki

pomiarowej (rysunek 21a). Na podstawie tych obrazów za pomocą przekształcenia **okrąg** tworzone są obrazy środków okręgów potencjalnie występujących w przekształcanych obrazach binarnych (rysunek 21b). Binarystacja tych obrazów pozwala na detekcję okręgów będących brzegiem analizowanych próbek (biała linia na rysunku 21c).

Dalsze działania polegają na wypełnieniu obszaru zawartego między lewym i prawym fragmentem wydetekowanego brzegu próbki. Iloczyn tak otrzymanego obrazu oraz obszarów ujawnionych w trakcie binaryzacji (rysunek 18) daje poprawny obraz poszukiwanych porów (rysunek 22).

W tabeli 1 przedstawiono udziały objętościowe porów wydetekowanych za pomocą obydwu omówionych w tym rozdziale metod detekcji niestandardowych obszarów analizy.

Analiza wyników przedstawionych w tej tabeli pokazuje, że w przypadku próbki zawierającej tylko pory zamknięte (rysunek 17a) wartość wyznaczonego udziału objętościowego nie zależy od zastosowa-

Tabela 1. Udział objętościowy porów w badanych próbkach.

Metoda detekcji	Udział objętościowy porów [%] w próbce:		
	a	b	c
I	9.8	7.1	7.2
II	10.0	12.4	27.5

nej metody detekcji mierzonych obiektów. Dla dwóch pozostałych próbek uzyskanie poprawnych wyników jest możliwe jedynie przy użyciu metody oznaczona symbolem II.

4. PODSUMOWANIE

Zastąpienie klasycznych, tj. manualnych i półautomatycznych, metod metalografii ilościowej przez metody komputerowe doprowadziło do istotnych zmian w procesie pomiarowym. Pomiar cech geometrycznych analizowanych elementów struktury, stanowiący największy problem dotychczas stosowanych metod, można opisać za pomocą uniwersalnych, niezależnych od morfologii tych obiektów algorytmów. Wystarczy tylko opracować odpowiednie programy komputerowe pozwalające na szybką i obiektywną realizację tego pomiaru. Dokładność ilościowego opisu struktury na podstawie wyników tak przeprowadzonego pomiaru uzależniona jest jedynie od tego, czy mierzone obiekty zostały prawidłowo ujawnione w końcowym obrazie binarnym. Jednym z czynników, który zdecydował o dominującej obecnie pozycji komputerowej analizy obrazu w metalografii ilościowej są możliwości, jakie technika ta stwarza w zakresie modyfikacji obrazów. Mniejsze znaczenie ma przy tym tworzenie nowych algorytmów. Ważniejszy jest

ich racjonalny dobór do konkretnych zastosowań. W artykule wykazano, że wymaga to dobrej znajomości metod analizy obrazu oraz programowania komputerów. Nie bez znaczenia jest jednak także – o czym często się zapomina – odpowiednia wiedza z zakresu materiałoznawstwa.

5. LITERATURA

- Bühler H.-E., Hougardy H.P.: Atlas of interference layer metallography, *Deutsche Gesellschaft für Metallkunde*, Oberursel 1980
- Cwajna J., Szala J., Maliński M., 1994, Image processing and image analysis in materials science: atlas - part 1, *STERMAT'94 IV International Conference "Stereology and Image Analysis in Materials Science"*, *Proceedings*, Beskid Śląski, 137-146.
- Fitton N.C., 1998, Optimizing the application of the Hough transform for automatic feature extraction from geoscientific images, *Computer & Geosciences*, 24, 10, 933-951.
- Guo R., Pandit S.M., 1998, Automatic threshold selection based on histogram modes and discriminant criterion, *Machine Vision and Applications*, 10, 331-338.
- Immerkar J., 1998, Some remarks on the straight line Hough transform, *Pattern Recognition Letters*, 19, 1133-1135.
- Kapur J.R., Sahoo P.K., Wong A.K.C., 1985, A new method for gray level picture thresholding using the entropy histogram, *Computer Vision Graph. Image Proc.*, 29, 273-285.
- Otsu N., 1979, A threshold selection method from grey-level histogram, *IEEE Trans. SMC-9*, Jan., 62-66.
- Radzikowska J., 2000, Color etching in foundry metallography, *Advanced Materials & Processes*, February, 29-32.
- Ridler T.W., Calvard S., 1978, Picture Thresholding Using an Iterative Selection Method, *SMC(8)*, No. 8, August, 629-632.
- Russ J.C., 1990, *Computer-Assisted Microscopy: The Measurement and Analysis of Images*. Plenum, New York.
- Ryś J., 1995, *Stereologia materiałów*, Fotobit Design, Kraków.
- Serra J., Vincent L., 1989, Lecture notes on morphological filtering, *Les Cahiers du Centre de Morphologie Mathématique de Fontainebleau*.
- Szala J., 1998, Sprawozdanie z pracy BK-209/RM-7/98 na temat „Metody stereologiczne w badaniach i projektowaniu mikrostruktury materiałów wielofazowych”, Katowice (praca niepublikowana).
- Szala J., 1999, Wykorzystanie metod analizy obrazu w mikroskopii, *Inżynieria Materiałowa*, Nr 3-4 (110-111), 103-111.
- Szala J., 2001, *Zastosowanie metod komputerowej analizy obrazu do ilościowej oceny struktury materiałów*, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria Hutnictwo z. 61, Gliwice.
- Szala J., Roskosz S., 1997, Methods of the automatic twin boundaries detection, *Proceedings of International Conference on the Quantitative Description of Materials Microstructure QMAT'97*, Warszawa, 529-534.
- Voss K., Süße H., 1991, *Praktische Bildverarbeitung*, Carl Hanser Verlag München, Wien.
- Wojnar L., 1999, *Image analysis Applications in Materials Engineering*, CRC Press LLC.
- Wojnar L., Kurzydłowski K. J., Szala J., 2002, *Praktyka analizy obrazu*, Polskie Towarzystwo Stereologiczne, Kraków.
- Wojnar L., Majorek M., 1994, *Komputerowa analiza obrazu*, Fotobit Design, Kraków.

Artykuł otrzymano 18 kwietnia 2003 r.

