

ANALIZA SEKWENCJI OBRAZÓW NIEJEDNORODNYCH

ZBIGNIEW RUDNICKI

AN ANALYSIS OF SEQUENCES OF NONUNIFORM IMAGES

Abstract

The images of sliding trace and transfer film on steel countersample disk were recorded during sliding of the samples of the two PTFE composites in pin-on-disk tribotester. The paper describes some methods of analysis of these image sequences performed to obtain features of image sequences which are the best discriminators of the two polymer composite materials with considerably different tribological properties. Static analysis of image classes and dynamic analysis of image sequences were investigated. Nonuniformity of images were defined and analysed with its positive and negative aspects. Some spatial-frequency filtering method was used to enhance uniform features of images and, on the other hand, a nonuniformity of some feature of images was used as a usefull feature to describe changes of images

1. WSTĘP

Komputerowa analiza obrazów jest w tribologii (nauce o tarczu) wykorzystywana jak na razie niezbyt często natomiast jest z powodzeniem stosowana w bardzo wielu innych dziedzinach jak metalografia, krystalografia, petrografia, medycyna (tomogramy, rentgenogramy, USG, itd.), analiza zdjęć satelitarnych, systemy wizyjne robotów i in.

Wiele metod stosowanych w komputerowej analizie, rozpoznawaniu i klasyfikowaniu obrazów może być z powodzeniem stosowanych nawet tam gdzie obrazy (w powszechnym rozumieniu) wcale nie występują. Analizowane komputerowo obrazy w postaci cyfrowej są bowiem złożonymi zbiorami danych a takie zbiory występują w wielu dziedzinach.

Autor starał się skomponować treść niniejszej publikacji na dwu płaszczyznach, tak aby mogli ją czy-

tać zarówno czytelnicy zainteresowani konkretnymi (wstępnymi) wynikami pewnych badań z dziedziny tribologii ale także ci czytelnicy których interesują możliwości zastosowania metod komputerowej analizy obrazów w dowolnej dziedzinie. Dlatego oprócz szczegółów związanych konkretnymi badaniami przedstawiono na ich przykładzie także ogólniejsze zagadnienia i rozważania dotyczące analizy obrazów. Szczególnie dotyczy to niejednorodności obrazów, jej ograniczania lub wykorzystywania oraz analizy zmian zachodzących w sekwencjach obrazów teksturowych (przedstawiających pewną fakturę powierzchni).

2. NIEJEDNORODNOŚĆ OBRAZÓW

Niejednorodność, rozumiana jako różnice cech poszczególnych części obrazu, spotykana jest w większości obrazów z dowolnych dziedzin. Niejednorod-

ność obrazu może mieć różnoraki charakter, może wynikać na przykład z nierównomiernego oświetlenia pola obrazu ale może także sygnalizować pojawienie się w polu widzenia interesujących obiektów, których dotyczyć ma analiza. Najczęściej różne typy niejednorodności występują równocześnie co komplikuje proces analizy obrazu. Także zależnie od celów analizy i postawionych hipotez, ta sama niejednorodność może być uznana za sygnał użyteczny lub za zakłócenie.

Ze względu na źródło powstania niejednorodności można rozróżnić:

- **niejednorodność rzeczywistą**, która sygnalizuje obecność obiektów lub obszarów obrazu istotnych z punktu widzenia celów analizy i wynikających z własności przedmiotu wizualizowanego, oraz
- **niejednorodność akwizycyjną** wynikającej z takich błędów akwizycji jak:
 - nieodpowiednie powiększenie
 - nierównomierne oświetlenie pola obrazu
 - nierównomierna ostrość w polu obrazu
 - artefakty (na przykład drobiny kurzu w układzie optycznym)

W szczególności należy pamiętać, że zastosowane zbyt duże powiększenie wywołuje niejednorodność akwizycyjną obrazu nawet w przypadku całkowicie regularnych tekstur.

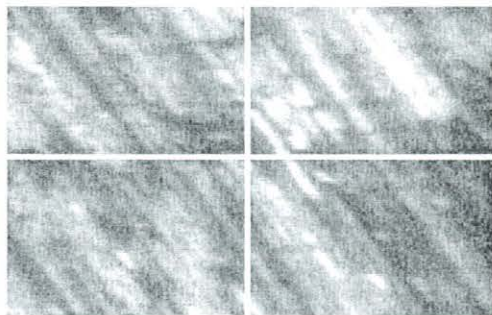
Przyjęto, że miara niejednorodności obrazu będzie definiowana:

- względem konkretnej cechy obrazu oraz
- dla ustalonego podziału obrazu na n podobrazów (okien) o jednakowych wymiarach

Za **miarę niejednorodności $NJn(Cx)$** obrazu względem danej cechy Cx przyjęto odchylenie standardowe (dyspersję) wartości deskryptora tej cechy w zbiorze n podobrazów. Przykładowo niejednorodność cechy Cx w zbiorze ćwiartek obrazu (niejednorodność ćwiartkowa) oznaczana będzie jako $NJ4(Cx)$.

Zmniejszyć niejednorodność można stosując:

- a) powiększenie okna obrazu lub zmniejszenie skali powiększenia obrazu
- b) segmentację



Rysunek 1. Niejednorodność wielkości ciemnych plam w ćwiartkach obrazu śladów tarcia.

c) filtrację

Najczęściej przy analizie obrazów niejednorodnych stosuje się **segmentację** obrazów czyli ich podział na obszary (segmenty) jednorodne. Autor testuje także alternatywny sposób polegający na bezpośrednim **wykorzystaniu niejednorodności** jako użytecznej cechy obrazu (p. 9).

W przypadku uznania niejednorodności za cechę niepożądaną, autor proponuje zastosowanie pewnego rodzaju **filtracji przestrzenno-częstotliwościowej** (p.7.1) jako jednej z możliwych metod ograniczania tej niejednorodności.

3. Geneza problemu

Wśród materiałów przeznaczonych do budowy łożysk ślizgowych istotną rolę odgrywają kompozyty zawierające PTFE (poli-tetra-fluoro-etylen). Przy współpracy ślizgowej kompozytu PTFE z powierzchnią stalową (Stachowiak i Batchelor 2001) występuje zjawisko transferu materiału polimerowego i tworzenia się cienkiej warstwy PTFE na powierzchni stali. Warstwa ta zwana filmem transferowym w przypadku PTFE działa bardzo korzystnie zmniejszając współczynnik tarcia i zwiększając trwałość łożyska.

Rozwój lub zanik filmu transferowego zależy od wielu czynników (Rhee, Ludema, 1978) m.in. warunków pracy łożyska (nacisk, prędkość ślizgania, temperatura) oraz struktury i składu polimeru. Badania zjawiska transferu materiału są prowadzone różnymi metodami między innymi przy zastosowaniu różnego rodzaju mikroskopów a także przy pomocy spektroskopowej analizy składu chemicznego. Badane są obrazy powierzchni na której powstaje film transferowy a także cząsteczki pyłu zużyciowego.

Niektóre badania stwierdzają bardzo szybkie powstawanie filmu transferowego, już na początku procesu tarcia, w pewnych warunkach jednakże film ten może ulegać zmianom a nawet zanikać. Na zbyt gładkiej powierzchni i przy niskiej temperaturze w strefie styku materiałów film transferowy może nie powstać lub tworzyć się wolno.

Niniejsza publikacja dotyczy fragmentu analiz **obrazów śladów tarcia** pozostawianych na powierzchni stalowej tarczy przez, współpracującą z nią ślizgowo, badane próbki kompozytów polimerowych.

4. CEL I OBIEKT BADAŃ

Celem badań było rozpoznanie:

- problemów akwizycji obrazów śladów tarcia
- warunków powstawania filmu transferowego oraz przebiegu zmian tego filmu
- możliwości identyfikacji własności tribologicznych

materiałów kompozytowych metodami analizy obrazów.

Obiekt badań stanowiły obrazy śladów tarcia ślizgowego pozostawiane na stalowej tarczy przeciwpróbkowej tribotestera typu pin-on-disk przez trące o nią próbki materiałów kompozytowych stosowanych do budowy łożysk a zawierających PTFE (poli-tetra-fluoro-etylen). Badano ślady pozostawiane przez próbki dwu materiałów kompozytowych a mianowicie: SM-2 – czysty tarflen oraz SM-K22G3 – tarflen z domieszkami koksu i grafitu.

Dla każdego z obu materiału rejestrowano po 10 referencyjnych obrazów dla czystej tarczy, przed rozpoczęciem procesu tarcia oraz po 150 obrazów dla każdego z trzech warunków pracy ślizgowej zdefiniowanych dociskiem F oraz prędkości poślizgu v :

L – warunki lekkie: $F = 30 \text{ N}$, $v = 0,84 \text{ m/s}$

S – warunki średnie: $F = 30 \text{ N}$, $v = 2,51 \text{ m/s}$

C – warunki ciężkie: $F = 100 \text{ N}$, $v = 2,51 \text{ m/s}$

Łącznie daje to $920 = 2 \cdot 10 + 6 \cdot 150$ obrazów. Każda sekwencja obrazów przedstawia to samo miejsce tarczy a jego obrazy rejestrowano dla kolejnych obrotów tarczy przeciwpróbkowej w sposób zsynchronizowany z tymi obrotami.

Z każdej sekwencji obrazów zmontowano film (animację). Obserwacja tych animacji wykazała m.in istnienie takich błędów akwizycji jak:

- nierównomierność oświetlenia na przestrzeni obrazu oraz fluktuacje jej w czasie
- nierównomierność ostrości w polu widzenia i między sekwencjami
- drobne przesunięcia między kolejnymi obrazami w sekwencji powodujące drgania przy odtwarzaniu sekwencji jako animacji.

5. ANALIZA STATYCZNA CZY DYNAMICZNA

Stan powierzchni stalowej tarczy przeciwpróbkowej jest zmienną losową zależną od miejsca (na śladzie tarcia)

i drogi pracy ślizgowej a więc pośrednio i czasu a także od wielu innych parametrów (jak: badany materiał, stan początkowy tarczy, warunki pracy i otoczenia).

Każdy z obrazów w pewien zakłócony i zniekształcony sposób odwzorowuje jeden punkt przestrzeni stanów a zarazem dodatkowo jest funkcją wielu czynników wpływających na proces akwizycji. Stosowane metody analizy obrazów powinny być dobrane odpowiednio do charakteru i szybkości zmian badanych stanów.

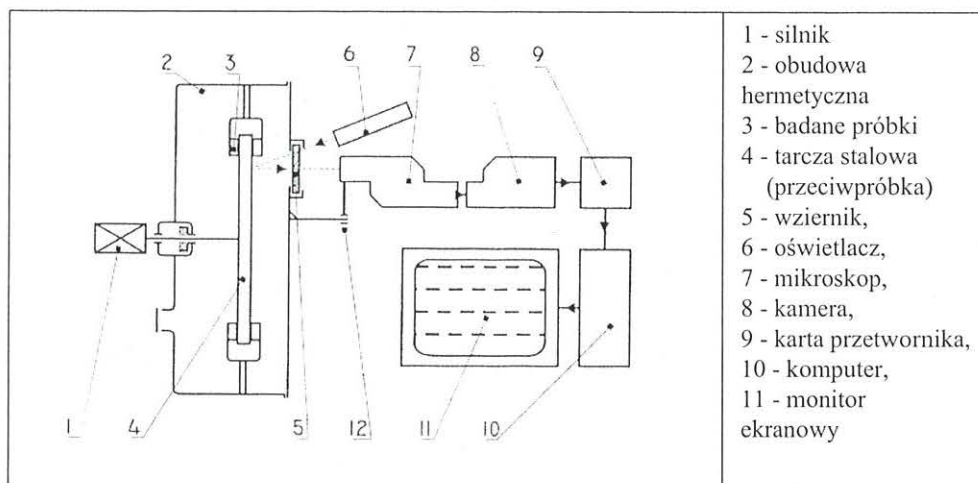
Ponieważ przedmiotowa warstwa filmu transferowego może powstać niemal natychmiast po rozpoczęciu tarcia i prawie nie ulegać zmianom ale przy innych badanych materiałach i warunkach pracy może narastać, zanikać lub wcale nie powstać więc praktycznie nie ma informacji wstępnych co do przebiegu zmian stanu powierzchni.

W tej sytuacji zastosowano dwa różne podejścia. Pierwszym jest **statyczna analiza obrazów** mająca na celu znalezienie dyskryminatorów klas obrazów czyli cech rozróżniających te klasy.

Każda klasa ma odpowiadać stanowi powierzchni w pewnym momencie czasu oraz konkretnemu badanemu materiałowi i konkretnym warunkom jego pracy (nacisk, prędkość). Pojęcie „moment” jest oczywiste w badaniach off-line – jest to punkt na osi czasu w którym na przedmiotową powierzchnię przestały działać czynniki zmieniające jej stan. Jednakże przy rejestrowaniu obrazów w trakcie eksperymentu (on-line) każdy obraz odpowiada innej chwili czasu i przypisanemu jej stanowi.

Aby więc pewien zbiór obrazów móc potraktować jak klasę odpowiadającą jednemu stanowi powierzchni trzeba przyjąć założenie, że czas akwizycji tego zbioru obrazów jest pomijalnie mały w stosunku do szybkości zmian stanu powierzchni.

Jak wspomniano prawdopodobne są przypadki, w których zmiana stanu powierzchni nastąpiła szybko, zaraz po rozpoczęciu tarcia, przy pierwszych nierejestrowanych obrotach tarczy i potem przy rejestracji



Rysunek 2. Schemat stanowiska do badań tribologicznych i akwizycji obrazów śladów tarcia.

obrazów utrzymał się stan stacjonarny powierzchni. Obserwacja obrazów pozwala dla niektórych (nie wszystkich) sekwencji rozważać taką hipotezę.

Takiemu założeniu może odpowiadać uznanie za klasy całych lub części sekwencji obrazów zarejestrowanych dla poszczególnych badanych materiałów i warunków pracy ślizgowej oraz przed tarcieniem

Jeśli z kolei przyjmie się że istnieją powolne zmiany zachodzące podczas akwizycji obrazów to jako pojedynczą klasę do analizy statycznej można przyjąć kilka kolejnych obrazów pobranych w krótkim odstępie czasu.

Tabela 1. Statyczna i dynamiczna analiza obrazów.

	Analiza obrazów (styczna):	Analiza sekwencji obrazów (dynamiczna):
Obrazy odpowiadają	Próbom losowym reprezentatywnym dla wybranych stanów powierzchni	Próbkowaniu sekwencyjnemu dla odwzorowania zmian stanu powierzchni
Lokalizacja pola widzenia	losowa dla kolejnych obrazów	stała dla pojedynczej sekwencji, losowa dla kolejnych sekwencji
Poszukiwane są cechy o wartościach	różnicujących klasy obrazów	odwzorowujących różnice między kolejnymi obrazami sekwencji

Ponieważ wspólne cechy obrazów danej klasy powinny zależeć od średniego stanu powierzchni a nie od badanego miejsca więc w statycznej analizie obrazów **lokalizacja** pobieranych obrazów śladów tarcia jako reprezentatywnych próbek z populacji **powinna być wybierana losowo**. Jeśli to niemożliwe to zamiast próby losowej może być wyodrębnienie w pojedynczym obrazie kilku **podobrazów**, co z kolei jest korzystne dla zapewnienia stałych warunków akwizycji.

Drugie podejście stanowi **dynamiczna analiza sekwencji obrazów** wybranego miejsca tarczy stalowej tribotestera rejestrowanych na bieżąco w sposób zsynchronizowany z obrotami tarczy. Sekwencje te pozwalają w pewnym stopniu obserwować rozwój filmu transferowego powstającego na powierzchni tarczy w konkretnym jej miejscu. Jednakże wnioski z badania sekwencji obrazów dotyczącej tylko jednego małego fragmentu śladu nie dają absolutnie podstaw do uogólnień statystycznych.

W przypadku statycznej analizy obrazów próbę losową stanowił zbiór obrazów natomiast w przypadku analizy sekwencji obrazów próbą losową powinien być zbiór sekwencji rejestrowanych dla różnych lokalizacji lecz w trakcie tego samego eksperymentu lub kolejnych eksperymentów przeprowadzonych w dokładnie tych samych warunkach (co może być trudne).

Jak widać dla uzyskania wyników opracowań statystycznych analiza sekwencji obrazów wymaga wielokrotnie większej liczby obrazów oraz czasu na ich akwizycję i analizę.

Tak więc zastosowany w powyższym eksperymencie tribologicznym sposób akwizycji obrazów nie odpowiada w pełni ani wymaganiom dotyczącym statycznej analizy klas obrazów odpowiadających stanom badanej powierzchni ani nie daje podstaw do uogólnień dotyczących obserwacji dynamicznych zmian tej powierzchni.

Mimo tego przy uwzględnieniu podanych wyżej założeń i przeprowadzono wstępną analizę obrazów zarówno statyczną jak i dynamiczną.

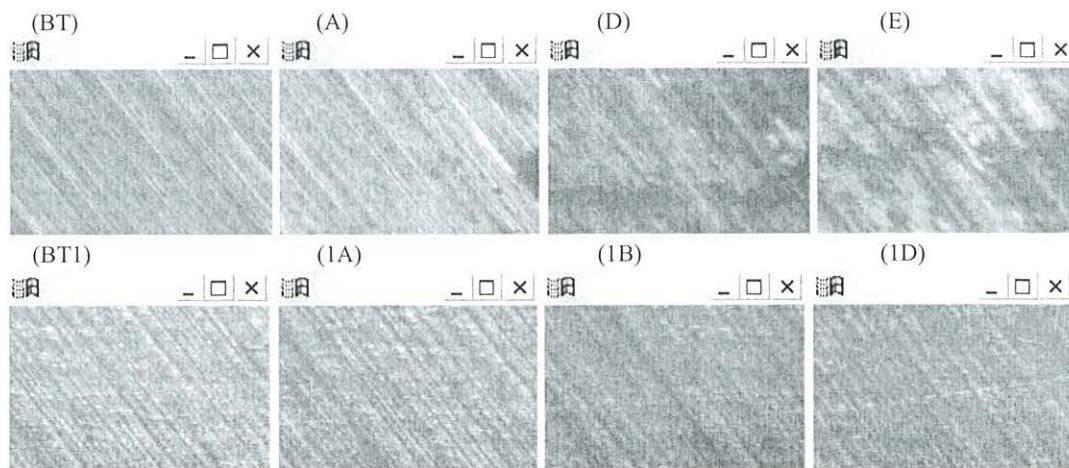
6. HIPOTEZY BADAWCZE

Podstawą formułowania hipotez była obserwacja obrazów z poszczególnych sekwencji. Na rysunku 3. pokazano po jednym obrazie z każdej z ośmiu sekwencji.

Na obrazach sekwencji A, D, E – odpowiadających materiałowi SM-K22G3 zawierającemu czarne domieszki (koks i grafit) – na tle mikrorys wynikających z obróbki materiału tarczy przeciwpróbkowej wyraźnie widoczna jest obecność czarnych plam, których parametry wydają się najbardziej istotnymi cechami sygnalizującymi zmiany skorelowane z procesem tarcia. Jednakże obrazy odpowiadające drugiemu materiałowi SM-2 nie wykazują widocznych plam – prawdopodobnie ze względu na niemal bezbarwny kolor materiału SM-2, co narzuca potrzebę zastosowania bardziej subtelnych metod detekcji zmian obrazów. Z takich wniosków można sformułować następujące hipotezy:

Hipoteza H1: Obrazy w sekwencji zarejestrowanej w pewnym przedziale czasu posiadają wspólne cechy, różne dla sekwencji odpowiadających poszczególnym materiałom i warunkom pracy ślizgowej. Jeśli tak jest to sekwencje te są oddzielnymi klasami.

Hipoteza H2: Dla danego kompozytu charakterystyczne są zmiany filmu transferowego odzwierciedlane przez **zmiany obszaru ciemnych plam** (na tle mikrorys ob-



Rysunek 3. Pojedyncze obrazy z ośmiu zarejestrowanych sekwencji.

róbczych) w funkcji drogi tarcia ślizgowego.

Hipoteza H1 może być słuszna dla sekwencji w których praktycznie nie widać zmian w czasie i być może szybkie ustalenie się nowego stanu powierzchni nastąpiło pomiędzy seriami pomiarów. W przypadku tej hipotezy istotne są **zmiany zachodzące w obrębie mikrorys** (tła obrazów) takie jak zmiana ich jasności, szerokości czy ostrości konturów. Równocześnie jest to hipoteza ryzykowna ze względu na możliwy wpływ błędów akwizycji a w szczególności możliwą skokową zmianę takich parametrów jak oświetlenie, ostrość, lokalizacja – względnie stałe dla danej sekwencji lecz mogące ulec zmianie przy zatrzymaniu eksperymentu i dość skomplikowanym zmienianiu docisku próbki (po otwarciu hermetycznej obudowy do której przytwierdzone są oświetlacze i kamera).

Słuszność hipotezy H2 ilustrują sekwencje obrazów w których widoczne są zmiany plam.

Odpowiednio do badanej hipotezy zastosowano przetwarzanie wstępne obrazów. Dla hipotezy H1 przetwarzanie wstępne obrazów ma na celu eliminację dużych ciemnych plam traktowanych jako zakłócenia lub błędy wynikające ze zbyt dużego powiększenia. W przypadku H2 odwrotnie: przeprowadzono segmentację wyodrębniając same plamy i eliminując tło mikrorys.

7. PRZETWARZANIE ORAZ STATYCZNA ANALIZA I KLASYFIKACJA OBRAZÓW ŚLADÓW TARCIA

Do przetwarzania i analizy wybrano z każdej serii po 4 obrazy dodatkowo dzieląc każdy z nich na 4 części. **Analiza obrazu** (statyczna) ma na celu redukcję informacji do jednego lub kilku liczbowych **deskryptorów** – miar wybranych **cech obrazu**. Zazwyczaj ana-

lizę poprzedza **przetwarzanie wstępne** obrazu – uwydatniające te cechy, kosztem innych cech uznanych za nieistotne.

7.1. Przetwarzanie wstępne

Dla analizowanych obrazów jako operacje przetwarzania wstępnego stosowano m.in.: poprawianie jasności i kontrastu, przez operacje normalizacji lub wyrównywania histogramów, filtrację medianową oraz przekształcanie obrazu na czarno-biały zwane binaryzacją lub progowaniem (Tadeusiewicz, Korohoda, 1997).

Przetestowano w szczególności dwa alternatywne warianty przetwarzania obrazów a mianowicie:

- poprawa kontrastu przez wyrównywanie histogramu oraz binaryzacja z progiem 127;
- filtracja medianowa pasmowa z zastosowaniem okien medianizacji 5×5 i 50×50 a po niej zastosowanie przekształceń jak w (a).

Zastosowana pasmowa filtracja medianowa eliminuje na obrazie składowe o niskiej częstotliwości przestrzennej (duże plamy) a także składowe o najwyższych częstotliwościach uznane za szum, pozwalając w tym etapie badań – zgodnie z hipotezą H1 – analizować zmiany w obszarze tła obrazów. Przykładowa realizacja tej filtracji (w Matlabie) jest następująca:

$$A1 = \text{medfilt2}(A, [5 \ 5]);$$

$$AL = \text{medfilt2}(A, [50 \ 50]);$$

$$B = \text{uint8}(\text{double}(A1) + 127 - \text{double}(AL));$$

gdzie:

A – obraz pierwotny; $A1$ – obraz po lekkiej filtracji medianowej usuwającej składowe najwyższych częstotliwości; AL – niskoczęstotliwościowa składowa obrazu;


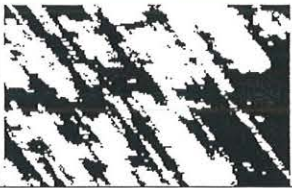
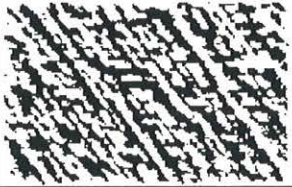
B – obraz wynikowy; $\text{medfilt2}(\text{obraz}, [D \ D])$ – funkcja medianizacji obrazu w oknie $D \times D$, przemiesz-

czanym po całym obrazie; *uint8* oraz *double* – funkcje konwersji typów zmiennych.

Zastosowana filtracja dodatkowo zmniejszyła radykalnie niejednorodność obrazu (rysunek 4).

i udostępnione w Internecie (COST B11).

Poniżej przedstawiono jedynie fragment analizy bazującej na wyznaczaniu współczynników „średnich gabarytów ciemnych plam” D_x , D_y . Współczynniki D_x ,

Obraz oryginalny (E_020) :		Niejednorodność obrazu (dyspersja procentowa) względem cech D_x , D_y dla zbioru ćwiartek obrazu:
Obraz po wyrównaniu histogramu i binaryzacji z progiem 127		$NJ4(D_x) = Std\%(D_x) = 17,5\%$ $NJ4(D_y) = Std\%(D_y) = 17,4\%$
Obraz po pasmowej filtracji medianowej (5, 50) i binaryzacji z progiem 127		$NJ4(D_x) = Std\%(D_x) = 7,2\%$ $NJ4(D_y) = Std\%(D_y) = 6,3\%$

Rysunek 4. Przetwarzanie wstępne obrazów i jego wpływ na jednorodność obrazów.

7.2. Dyskryminatory klas obrazów

Klasyfikacja obrazów wymaga cech będących dobrymi dyskryminatorami klas czyli cech o małym rozrzucie w ramach danej klasy a zarazem dużym rozrzucie w zbiorze klas. Za miernik zdolności dyskryminacyjnej często przyjmuje się współczynnik Fisher'a (Rudnicki 2002) równy stosunkowi wariancji międzyklasowej do średniej wariancji wewnątrzklasowej.

W ramach badań wyznaczano wiele różnorodnych deskryptorów cech zarówno dla obrazów oryginalnych (szarych) jak i przetworzonych na czarno-białe (binarne). Stosowanymi narzędziami były: Matlab Image Toolbox oraz programy MaZda i Convert (259 cech) opracowane dla celów analizy medycznych obrazów tomograficznych

D_y wyznaczano dla obrazów przetworzonych na czarno-białe:

$$D_x = Lc/N_x, D_y = Lc/N_y \quad (1)$$

gdzie:

Lc – liczba czarnych pikseli obrazu,
 N_x – średnia liczba plam w kierunku x (dokładniej liczba przejść z bieli do czerni w wierszach obrazu),
 N_y – j.w. lecz dla kierunku y (w kolumnach obrazu).
następnie wyznaczono cechy:

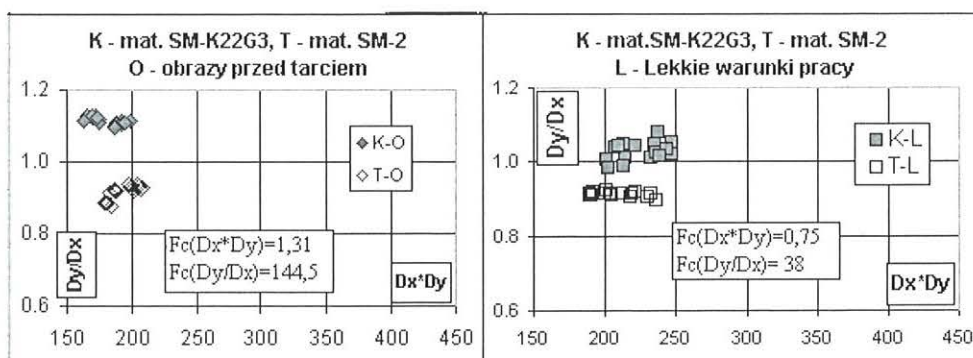
„średnie pole ciemnej plamy”:

$$D_{xy} = D_x \cdot D_y \quad (2)$$

„średnią anizotropię ciemnych plam”:

$$A_{yx} = D_y/D_x \quad (3)$$

Poszukiwanie deskryptora o minimalnym rozrzucie wewnątrz klasy narzuca oczywiście minimalizację rozrzutu w zbiorze ćwiartek obrazu czyli wymóg jed-



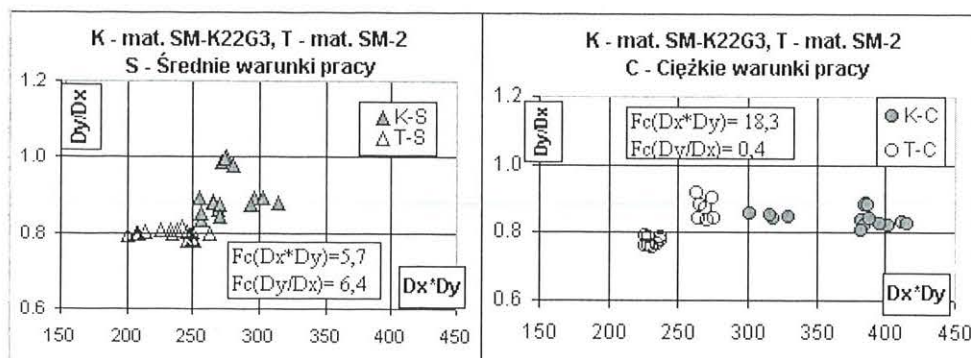
Rysunek 5. Klasyfikacja w przestrzeni cech D_{xy} , A_{yx} obrazów referencyjnych oraz obrazów śladów tarcia dwu materiałów kompozytowych dla lekkich warunków pracy.

norodności obrazu względem cechy, która ma być dyskryminatorem klas. Dzięki opisanej wyżej pasmowej filtracji medianowej niejednorodności ćwiartkowe obrazu $NJ4(Dx)$, $NJ4(Dy)$ względem cech Dx , Dy zmniejszyły się z ok. 17% na ok. 7% (rys. 4).

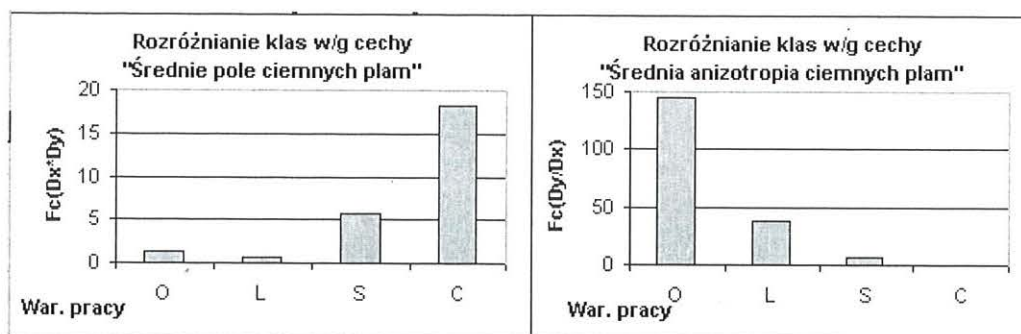
Wyznaczone cechy: Dxy oraz Ayx są dobrymi dyskryminatorami badanych klas obrazów co ilustrują rysunki 5, 6, 7.

lizowaną cechę przyjęto zmiany sumarycznego pola ciemnych plam (to znaczy plam o odcieniu ciemniejszym od średniego poziomu szarości obrazu).

Poniżej przedstawiono dwie zastosowane metody detekcji tych zmian.



Rysunek 6. Klasyfikacja w przestrzeni cech Dxy , Ayx obrazów śladów tarcia dwu materiałów kompozytowych dla średnich i ciężkich warunków pracy.



Rysunek 7. Zdolność dyskryminacyjna cech: średnie pole oraz średnia anizotropia ciemnych plam.

Jednakże problem identyfikacji materiałów i warunków pracy na podstawie tych obrazów pozostaje dyskusyjny i wymaga dalszych badań. W ramach dyskusji wyników warto zauważyć, że:

- w miarę zaostrzania warunków pracy rośnie średnie pole tworzonych ciemnych plam jednak znacznie szybciej dla kompozytu z domieszkami grafitu i koksu, wskutek czego ślady obu materiałów różnią się coraz bardziej, natomiast
- zmniejsza się dla obu materiałów i zrównuje wzajemnie anizotropia tych plam.

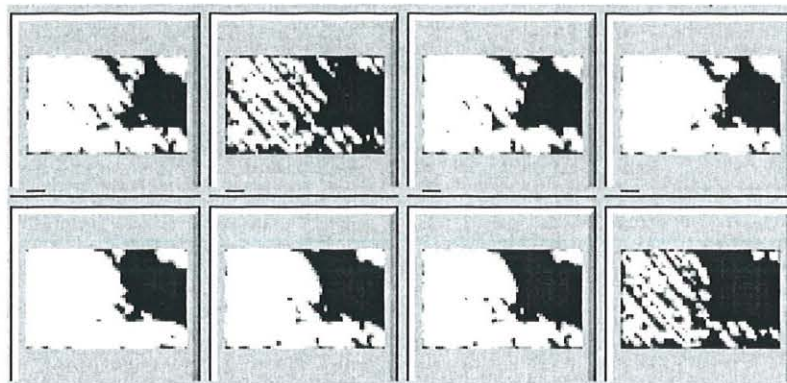
8. ANALIZA SEKWENCJI OBRAZÓW

Celem dynamicznej komputerowej analizy sekwencji obrazów jest odwzorowanie ciągu obrazów na ciąg liczb reprezentujących wartości wybranej cechy dla kolejnych obrazów z sekwencji. Po obserwacji animacji otrzymanych z zarejestrowanych sekwencji, jako ana-

8.1. Różnicowa detekcja zmian

W tej metodzie zastosowano odejmowanie pierwszego obrazu od pozostałych obrazów sekwencji, a następnie operacje wyrównywania histogramu obrazu i binaryzacji (z progiem 127). Jest to metoda bardzo czuła pozwalająca wykryć zmiany niewidoczne dla obserwacji. Niestety niestabilność oświetlacza i wynikające z niej fluktuacje średniej jasności obrazów spowodowały, że efekty tej metody były obarczone błędami grubymi dla niektórych obrazów, co pokazano na rysunku 8.

Dużo czasu poświęcono różnym wariantom tej metody co ostatecznie doprowadziło do interesujących wyników, które zostaną przedstawione w oddzielnej publikacji.



Rysunek 8. Fragment sekwencji obrazów po zastosowaniu detekcji różnicowej. Widoczny jest rozrost ciemnej plamy i błędy dla obrazów słabiej oświetlonych.

8.2. Detekcja zmian przy wykorzystaniu parametrów histogramu obrazu

Histogram obrazu cyfrowego to wektor: $\mathbf{H} = [H_0, H_1, \dots, H_g, \dots, H_{Lg-1}]$, którego składowe H_g podają dla każdego odcienia szarości g , ($0 \leq g \leq Lg$) liczbę pikseli obrazu posiadających ten odcień.

Wartości **histogramu znormalizowanego** Hn_g otrzymuje się przez podzielenie odpowiednich wartości H_g przez całkowitą liczbę pikseli ($Lw \cdot Lk$):

$$Hn_g = \frac{H_g}{Lw \cdot Lk} \quad g = 1, 2, \dots, Lg-1 \quad (4)$$

gdzie: Lw, Lk – rozmiary macierzy obrazu cyfrowego, $Lg = 256$ – dopuszczalna liczba odcieni szarości

Niektóre parametry statystyczne histogramu obrazu przedstawiono w tabeli 1.

W szczególności zainteresowano się takimi parametrami jak skośność (rys. 9) oraz kurtoza lub eksces (rys. 10), które (co potwierdzono eksperymentalnie) są w dużym stopniu niewrażliwe na zmiany średniej jasności obrazu.

Jak widać na rysunku 11 kurtoza histogramów do-

brze sygnalizuje subtelne (c, d) zmiany obrazu (pojawienie się słabo widocznych plam) natomiast dla wyraźnych zmian obrazu (a, b) zmiany kurtozy trudno przewidzieć ze względu na jej nieliniowy charakter (krzywa czwartego stopnia).

Dla materiału SM-K22G3 (na rys. 12a oznaczonego przez K) średnia wartość kurtozy jest niższa niż dla drugiego materiału i obniża się nadal przy ciężkich warunkach pracy (rys. 12b).

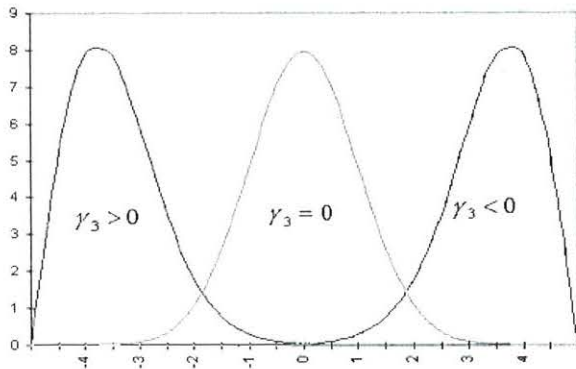
9. DETEKCCJA ZMIAN PLAM PRZY WYKORZYSTANIU NIEJEDNORODNOŚCI OBRAZU

Analizowano niejednorodność obrazów względem kurtozy histogramu. Konkretnie miarą tej niejednorodności było odchylenie standardowe z czterech wartości kurtozy histogramu obliczanej dla każdej ćwiartki obrazu.

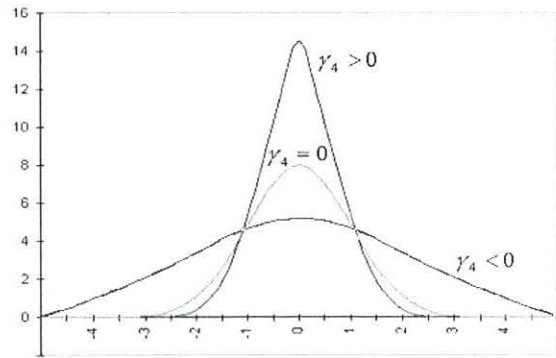
Uzyskane przebiegi pokazane na rysunkach 13, 14, 15 wykazują istotne różnice w przebiegu zmian dyspersji kurtozy histogramów dla poszczególnych sekwencji obrazów co może być podstawą do dalszych badań dotyczących charakterystyki rozwoju filmu transfero-

Tabela 1. Parametry statystyczne histogramu obrazu.

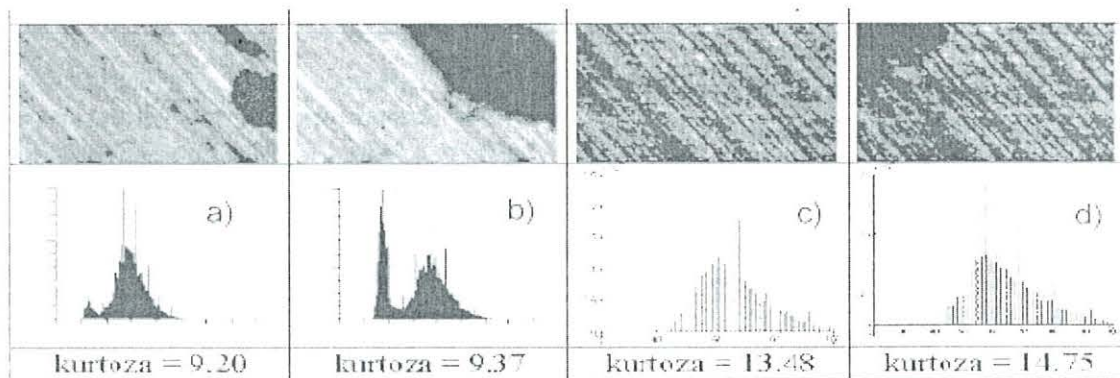
średnia	$\mu = \sum_{g=0}^{Lg-1} g \cdot Hn_g \quad (5)$	skośność - współcz. asymetrii	$\gamma_3 = \sigma^{-3} \cdot \sum_{g=0}^{Lg-1} (g - \mu)^3 \cdot Hn_g \quad (6)$
wariancja - drugi moment centralny	$\sigma^2 = \sum_{g=0}^{Lg-1} (g - \mu)^2 \cdot Hn_g \quad (7)$	czwarty moment centralny	$\mu_4 = \sum_{g=0}^{Lg-1} (g - \mu)^4 \cdot Hn_g \quad (8)$
dyspersja - odchylenie standardowe	$\sigma = \sqrt{\sum_{g=0}^{Lg-1} (g - \mu)^2 \cdot Hn_g} \quad (9)$	kurtoza - współcz. koncentracji	$K = \frac{\mu_4}{\sigma^4} = \sigma^{-4} \cdot \sum_{g=0}^{Lg-1} (g - \mu)^4 \cdot Hn_g \quad (10)$
trzeci moment centralny	$\mu_3 = \sum_{g=0}^{Lg-1} (g - \mu)^3 \cdot Hn_g \quad (11)$	eksces	$\gamma_4 = K - 3 = \sigma^{-4} \cdot \sum_{g=0}^{Lg-1} (g - \mu)^4 \cdot Hn_g - 3 \quad (12)$



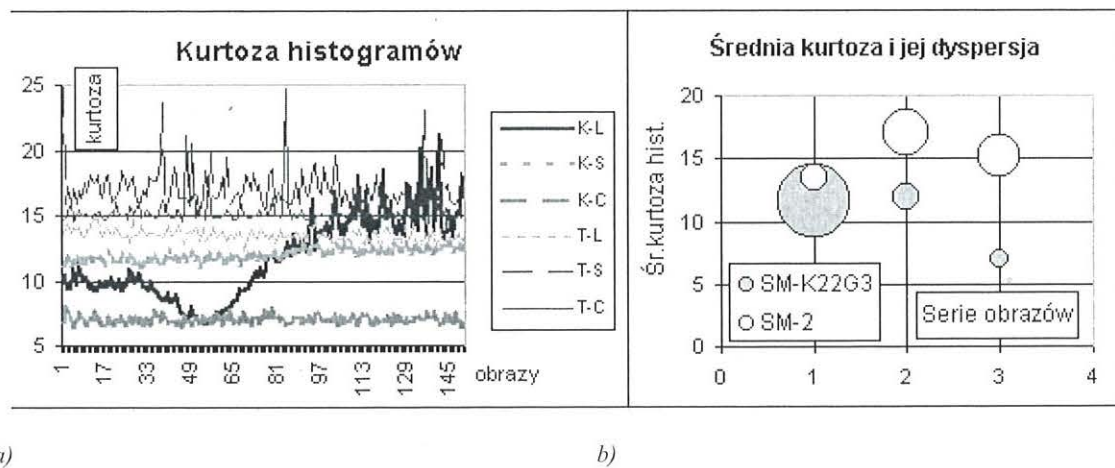
Rysunek 9. Skośność - miernik asymetri histogramu.



Rysunek 10. Eksces określa stromość histogramu.



Rysunek 11. Histogramy i wartości kurtozy przykładowych obrazów.



a)

b)

Rysunek 12. a) Kurtoza histogramów obrazów, b) Średnia kurtoza w seriach obrazów oraz jej dyspersja.

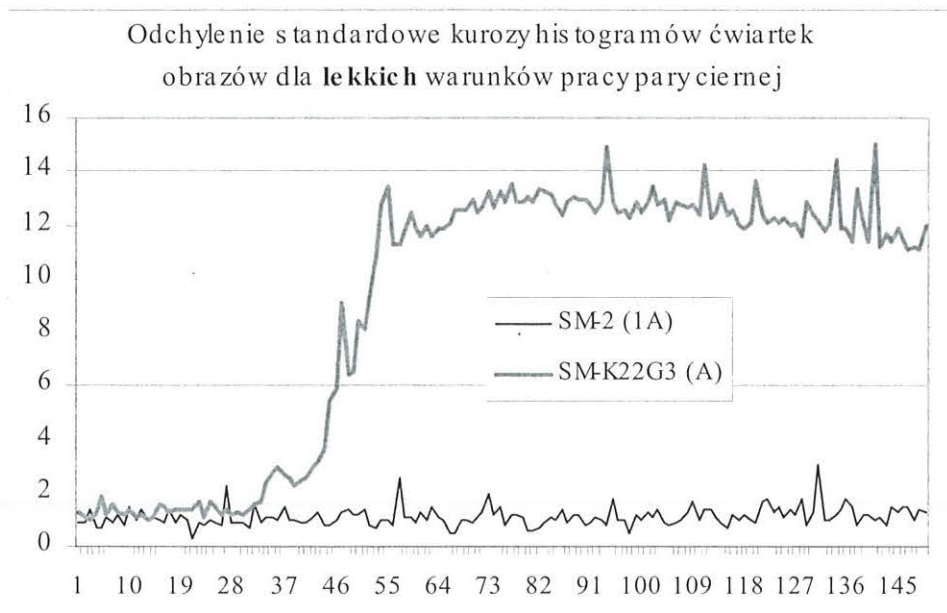
wego dla badanych materiałów kompozytowych.

Przebiegi te są również w znacznym stopniu zgodne są z zaobserwowanymi na animowanych sekwencjach zmianami ciemnych plam. W szczególności dobrze odwzorowany został na rysunku 13 wzrost ciemnej plamy wyraźnie obserwowany w serii obrazów (A). Najprawdopodobniej nie można jednak uznać tych przebiegów za wiernie odwzorowanie zmian pola ciemnych plam ze względu na wspomnianą nieliniowość kurtozy. Przeprowadzone dalsze badania dotyczące wykorzystania zmian parametrów histogramu oraz ich niejednorodności w detekcji zmian plam na obrazach przedstawione będą w kolejnych publikacjach.

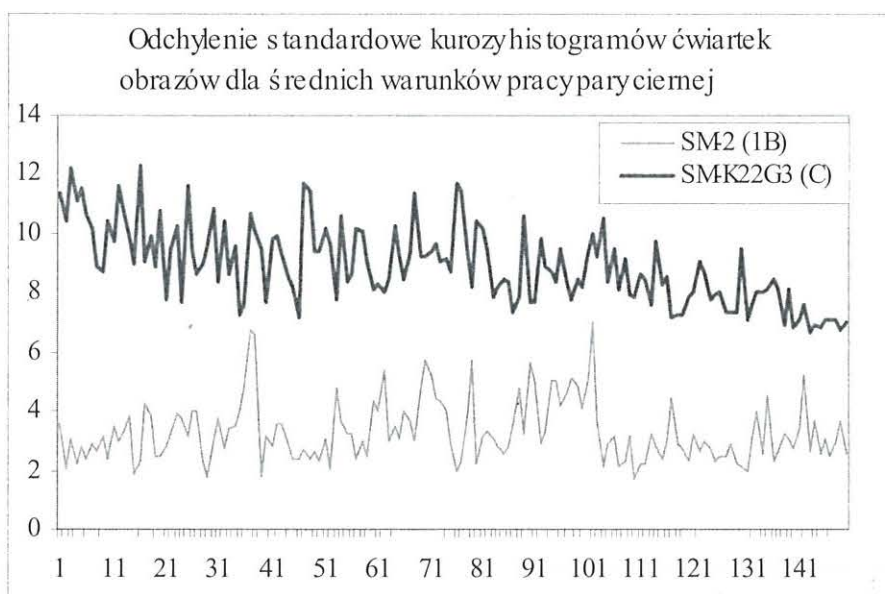
10. PODSUMOWANIE

Analiza obrazów i analiza ich sekwencji to dwie różne choć pokrewne i często uzupełniające się dziedziny.

W artykule przedstawiono szereg problemów dotyczących analizy zbiorów obrazów powierzchni rejestrowanych on-line w trakcie procesu tarcia ślizgowego. Przedyskutowano możliwość zastosowania analizy obrazów (statycznej) i ich sekwencji (analizy dynamicznej). Stwierdzono znaczną prostotę i skuteczność statycznej analizy obrazów nawet w przypadku sekwencji rejestrowanych on-line.



Rysunek 13. Zmiany niejednorodności kurtozy histogramów w sekwencjach obrazów.



Rysunek 14. Zmiany niejednorodności kurtozy histogramów w sekwencjach obrazów.

Wyniki analizy statycznej wykazują, że w miarę zaost్రzania warunków pracy pary ślizgowej:

- rośnie średnie pole tworzonych ciemnych plam dla obu badanych kompozytów, jednak znacznie szybciej dla kompozytu z domieszkami grafitu i koks, u,
- zmniejsza się dla obu materiałów i zrównuje wzajemnie anizotropia tych plam.

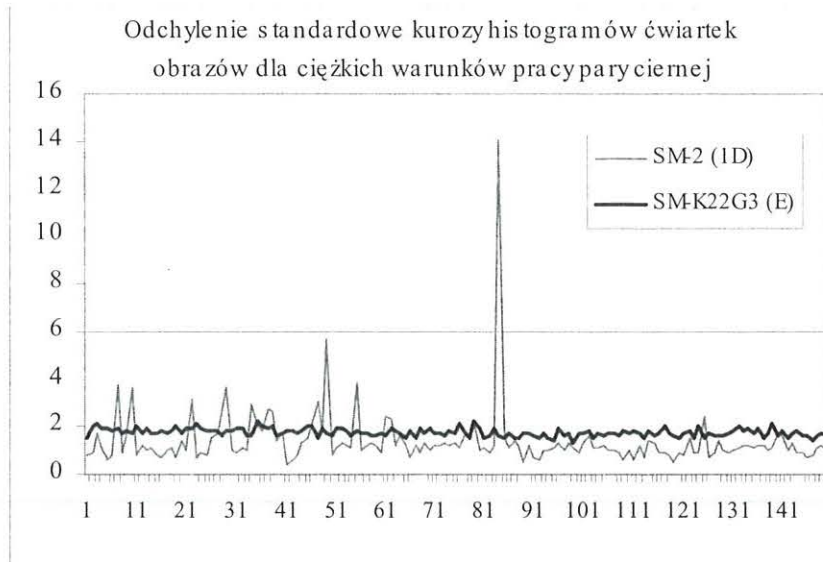
Przeanalizowano problem niejednorodności obrazu podkreślając, że:

- niejednorodność obrazu może wynikać z błędów akwizycji lub z rzeczywistej niejednorodności obiektu
- niejednorodność jest różna dla różnych cech obrazu, zależy od wielkości badanego obszaru i może

dla pewnych cech być zmniejszona przez zastosowanie filtracji

- zmiany niejednorodności mogą być wykorzystane jako użyteczna cecha do śledzenia zmian obrazów
- Przetestowano różnicową detekcję rozwoju zmian ciemnych plam na obrazach stwierdzając problemy w jej stosowaniu w warunkach błędów akwizycji obrazu.

Zbadano możliwości wykorzystania kurtozy histogramów obrazów jako cechy odpornej na fluktuacje jasności wynikające ze zmian oświetlenia obrazu. Stwierdzono że stanowi ona cechę użyteczną szczególnie dla śledzenia zmian słabo widocznych plam na obrazach natomiast ma ograniczone zastosowanie w



Rysunek 15. Zmiany niejednorodności kurtozy histogramów w sekwencjach obrazów.

przypadku wyraźnych zmian – ze względu na swój nieliniowy charakter.

Generalnie stwierdzono znacznie wyższy poziom trudności i pracochłonności przy dynamicznej analizie sekwencji obrazów, trudności w doborze odpowiednich metod pomiaru i interpretacji wyników w porównaniu z analizą statyczną.

LITERATURA

- COST B11 - witryna internetowa, www.eletel.p.lodz.pl/cost/cost_b11.html
- Rhee, S., Ludema, K., 1978, *Mechanisms of formation of polymeric transfer films*, *Wear*, 46, 231-240.
- Rudnicki, Z., 2002, *Wybrane metody przetwarzania i analizy cech obrazów teksturowych*, *Informatyka w Technologii Materiałów*, 2, 1-18.
- Stachowiak, G., Batchelor, A., *Engineering Tribology*, Butterworth – Heinemann – Woburn, 2001.
- Tadeusiewicz, R., Korohoda, P., 1997, *Komputerowa analiza i przetwarzanie obrazów*, Wydawnictwo Fundacji Postępu Telekomunikacji, Kraków.

Artykuł otrzymano 12 czerwca 2003 r.