

ANALIZA OBRAZÓW POWIERZCHNI W PROCESIE TARCIA ŚLIZGOWEGO

ZBIGNIEW RUDNICKI, ZBIGNIEW MIKRUT

SURFACE IMAGES ANALYSIS IN SLIDING FRICTION PROCESS

Abstract

The presented work investigates a possibility of using computer image analysis methods in tribological tests of some PTFE composites, which are often applied in sliding bearings production. The images of friction traces, deposited by tested materials on the steel disk of pin-on-disk tribotester, were analyzed. These traces concern "transfer film" - a thin layer of PTFE on the steel counterface which greatly influence on friction and wear processes. Especially the changes of a size and position of these traces were examined at the registered image sequentions. Some methods of segmentation and feature extraction were described. The results were compared with other, earlier obtained. Tribological conclusions were formed.

1. WPROWADZENIE I GENEZA BADAŃ

Łożyska ślizgowe napędów maszyn zbudowane z tworzyw sztucznych współpracują zazwyczaj ze stalowymi wałami. Ważną cechą takiej współpracy cierno-ślizgowej jest przeniesienie (transfer) cząstek polimeru na powierzchnię stali (Rymuza, 1986; Stachowiak i Batchelor, 2001). Przeniesione cząstki mogą tworzyć różnego rodzaju skupiska zależnie od składu materiałów, warunków pracy i parametrów otoczenia. Szczegółne własności posiadają materiały zawierające PTFE (poli-tetra-fluoro-etylen o fabrycznych nazwach „teflon” lub „tarflen”), które w pewnych warunkach mogą tworzyć na powierzchni stali dość równomierną warstwę nazywaną w literaturze filmem transferowym (transfer film). Warstwa ta jest czynni-

kiem korzystnym – zmniejszającym tarcie i zwiększającą odporność łożysk na zużycie.

W niniejszej pracy filmem transferowym nazywane są wszelkie ślady pozostawiane na powierzchni stali przez trący o nią polimerowy materiał kompozytowy.

Prace opisujące zastosowanie metod analizy obrazów w tribologii są raczej nieliczne. Przykładowo Stachowiak (1998) oraz Podsiadło i Stachowiak (2000) opisują zastosowania analizy fraktalnej do charakteryzowania powierzchni trących i cząstek zużyciowych. Inna ich praca (1999) dotyczy opisywania anizotropii powierzchni przy zastosowaniu transformacji Hurst'a, natomiast Umeda, Sugimura i Yamamoto (1998) opisują próby określania zużycia powierzchni przy pomocy deskryptorów teksturowych obrazów (wyznaczanych z tzw. macierzy współwystąpień).



Ciekawe rezultaty uzyskali Franklin i de Kraker (2003) badając wpływ chropowatości powierzchni stali na zużycie polimeru przy dwu różnych obciążeniach. Zwrócili oni uwagę na zmiany obrazu filmu transferowego towarzyszące zmianom szybkości zużycia. Stwierdzono mianowicie spadek współczynnika tarcia oraz zużycia przy początkowym zwiększaniu chropowatości powierzchni z $Ra = 0,08 \mu m$ do $Ra = 0,4 \mu m$ oraz towarzyszącą temu zmianę obrazu filmu transferowego z małych pojedynczych skupisk ($<20 \mu m$) w równomiernie rozłożone pasma pokrywające całą strefę tarcia. Przy dalszym zwiększaniu chropowatości ($Ra > 0,45$), następował znacznie szybszy wzrost zużycia a na obrazach filmu transferowego powstawały duże plamy ($>100 \mu m$).

Jak widać zmiany obrazów filmu transferowego towarzyszą zjawiskom warunkującym zmiany współczynnika tarcia oraz szybkości zużycia materiałów polimerowych.

Praca niniejsza opisuje próby zastosowania metod komputerowej analizy sekwencji obrazów, rejestrowanych on-line w trakcie tarcia, do badania warunków rozwoju i zaniku filmu transferowego i możliwości oceny ścieralności i innych własności tribologicznych materiałów kompozytowych stosowanych do produkcji łożysk ślizgowych oraz uszczelnień bezsmarowych tłoków sprężarek.

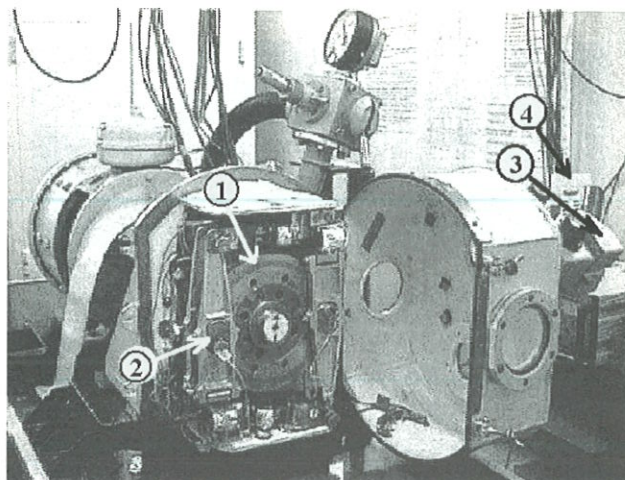
Prezentowane badania prowadzono w ramach grantu KBN 7T07C 03318: „Metodyka szybkiego oznaczania parametrów tribologicznych tworzyw konstrukcyjnych współpracujących ślizgowo w wybranych ośrodkach gazowych lub w próżni” kierowanym przez dr inż. Zbigniewa Oleksiaka z Zakładu Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn AGH, któremu autorzy serdecznie dziękują za pomoc.

2. Przedmiot badań

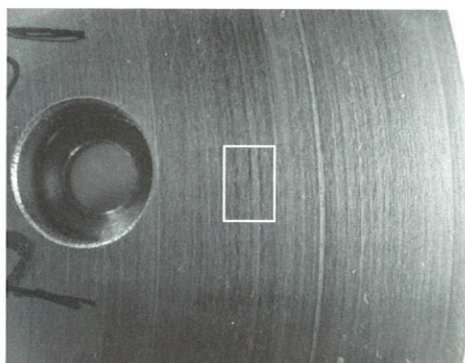
Bezpośredni materiał do badań stanowiły sekwencje obrazów rejestrowane w trakcie eksperymentów tribologicznych wykonywanych na stanowisku (Oleksiak 1993) pokazanym na rysunku 1.

Eksperymenty tribologiczne polegały na tarcu próbek badanego materiału kompozytowego zawierającego PTFE o stalową tarczę przeciwpróbkową (1). Tarcza wraz z próbkami umieszczona była w hermetycznej obudowie pozwalającej na realizację badań przy obniżonym ciśnieniu atmosferycznym oraz w atmosferze określonych gazów.

Akwizycja obrazów była prowadzona za pośrednictwem mikroskopu (3), zamontowanego przy wzierniku w pokrywie obudowy, wyposażonego w oświetlacz błyskowy oraz kamery cyfrowej (4) podłączonej do komputera.



Rysunek 1. Stanowisko badawcze: 1 - tarcza tribotestera ze śladami tarcia, 2 - uchwyty próbek, 3 - mikroskop, 4 - kamera. (Research apparatus: 1 - tribotester disk with friction traces, 2 - sample holder, 3 - microscope, 4 - camera).



Rysunek 2. Fragment tarczy przeciwpróbkowej ze śladem tarcia i obserwowanym wycinkiem. (The part of countersample disk with friction traces and observed area).

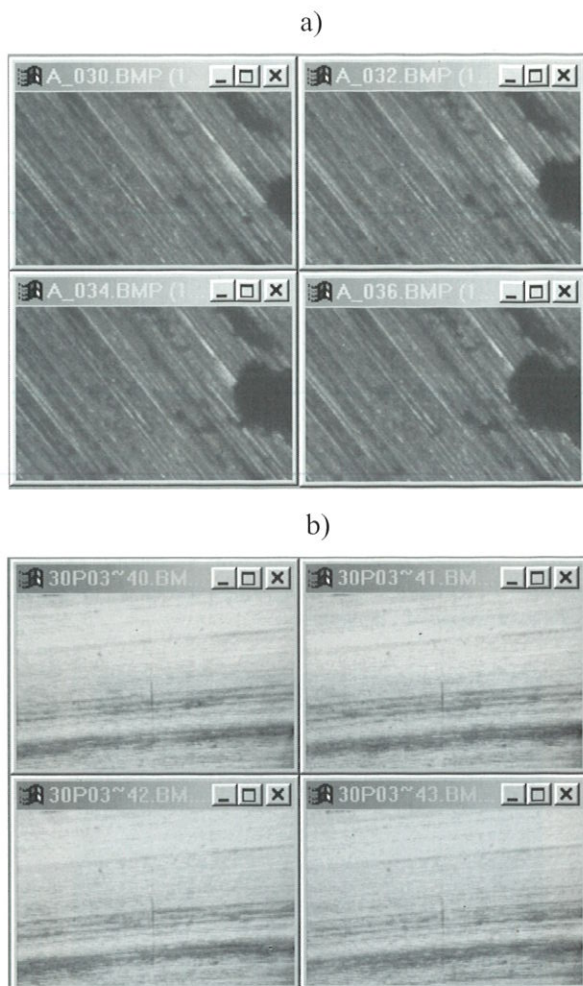
Dzięki zsynchronizowaniu błysków oświetlacza i momentów akwizycji obrazów z obrotami tarczy, uzyskiwano przy każdym obrocie obraz tego samego wycinka tarczy (rys. 2).

Parametry oświetlacza i elektronicznej migawki pozwalały osiągać minimalny czas ekspozycji rzędu jednej milionowej sekundy. Jednak przy zmniejszaniu czasu ekspozycji otrzymuje się coraz ciemniejsze obrazy.

Próbki poddawane tarcu wykonane były z dwu materiałów (produkcji Zakładów Azotowych w Tarnowie): czystego tarflenu SM-2, oraz K22G3 zawierającego oprócz PTFE dodatki 22% koksu i 3% grafitu. Powierzchnia przekroju próbki wynosiła 96 mm^2 ($8 \times 12 \text{ mm}$).

Równocześnie z obrazami rejestrowano: siłę docisku próbek, prędkość obrotową tarczy, składowe siły tarcia oraz temperaturę wewnątrz próbki w pobliżu powierzchni trącej.

Analizowane sekwencje obrazów (tablica 1) pochodzą z dwu grup. Sekwencje z grupy pierwszej



Rysunek 3. Przykładowe obrazy: a) z grupy 1, serii A, b) z grupy 2, serii 30P03c. (Example images: a) from group 1, sequence A, b) from group 2, sequence 30P03c.

rejestrowane były przy chropowatości tarczy $Ra \approx 0,3 \mu\text{m}$ i oświetleniu bocznym, natomiast przy sekwencjach z grupy drugiej – tarcza była o wiele gładsza

(chropowatość $Ra \approx 0,03 \mu\text{m}$) oraz (w związku z poprzednimi kłopotami z utrzymaniem niezmienności oświetlenia) zastosowano oświetlenie prostopadłe do tarczy poprzez jeden z dwu okularów mikroskopu. Dla tej grupy sekwencji przyjęto konwencję określania nazw obrazów zgodnie z zastosowanymi warunkami pracy ślizgowej, a mianowicie początek nazwy (serii pomiarów) ma ogólną budowę " $nnKpp$ ", gdzie:

- nn – wartość siły nacisku w [N], stosowano naciski: 0 (bez tarcia), 10 [N], 30 [N],
- K – kierunek obrotów tarczy (L – w lewo, P – w prawo),
- pp – prędkość ślizgania w [dm/s], zadawano prędkości: 0,3 m/s, 1 m/s, 3 m/s.

W materiale badawczym jaki stanowiły zarejestrowane sekwencje obrazów, przedmiotem zainteresowania były przebiegi czasowe cech obrazów odzwierciedlające rozwój, zmiany i zanik skupisk „filmu transferowego” nanoszonych na powierzchnię stalowej tarczy tribotestera przez próbki badanych materiałów kompozytowych a nazwanych roboczo „plamami”.

Ponieważ sekwencje grupy 1 – a w szczególności sekwencja „A” pokazująca rozwój dużej plamy filmu transferowego – były już uprzednio badane (Rudnicki 2003a, 2003b), więc w niniejszych badaniach stanowiły głównie materiał porównawczy dla orientacyjnej oceny nowo wprowadzonych metod analizy obrazów.

3. Cele badań

Celem badań w dziedzinie tribologii było:

- Zbadanie przebiegu rozwoju, zmian i zaniku warstewki „filmu transferowego” w zależności od wa-

Tablica 1. Dane charakteryzujące sekwencje obrazów. (The data of image sequences).

Sekwencja: Parametr:	Grupa 1						Grupa 2		
	A	D	E	1A	1B	1D	30P03 30P03K	30P10	30P30
materiał próbki	K22G3	K22G3	K22G3	SM-2	SM-2	SM-2	K22G3	K22G3	K22G3
chropowatość tarczy Ra [μm]	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,03	0,03	0,03
nacisk F [N]	30	30	61	30	30	61	30	30	30
nacisk jednost p [kPa]	312,5	312,5	635,4	312,5	312,5	635,4	312,5	312,5	312,5
prędk. obr. [obr/min]	100	300	300	100	300	300	35,7	119	357,1
prędkość liniowa ślizgania v [m/s]	0,84	2,52	2,52	0,84	2,52	2,52	0,3	1	3
iloczyn $p v$ [kN/s]	262,5	784,4	1594,9	262,5	784,4	1594,9	93,75	312,5	937,5
kier. oświetlenia [$^\circ$]	60	60	60	60	60	60	90	90	90
czas ekspoz. t_e [μs]	8	8	8	8	8	8	8	8	8
liczba obrazów w sekwencji N_s	150	150	150	150	150	150	4 x 20 4 x 20	3 x 20	3 x 20
L. obrotów między ekspozycjami	1	1	1	1	1	1	2	4	12

runków tarcia ślizgowego.

W dziedzinie przetwarzania i analizy obrazów celem ogólnym było:

- dążenie do opracowania optymalnej metody śledzenia zmian ciemnych plam filmu transferowego na tle teksturowego obrazu stalowej tarczy przeciwpróbkowej, metody niewrażliwej na zakłócenia procesu akwizycji lub kompensującej te zakłócenia.

Celem doraźnym było:

- zbadanie przebiegu zmian całkowitego pola plam (jako procentu pola obrazu),
- zbadanie charakteru pionowych i poziomych przemieszczeń skupisk ciemnych plam filmu transferowego.

4. Wstępna ocena obrazów i zakłóceń

Pomimo bogactwa potencjalnych możliwości komputerowej analizy, bardzo ważne we wstępnych etapach jest nie zaniedbanie konwencjonalnej wnikliwej obserwacji zgromadzonego materiału i nie zlekceważenie wszelkich wniosków jakie mogą z niej wynikać i być pomocnymi przy wytyczaniu kierunków dalszych analiz.

W związku z tym zarejestrowane sekwencje – po wstępnym przetwarzaniu poprawiającym jakość i uwydatniającym badane cechy – obserwowano zarówno w postaci filmów (animacji) jak i zbiorów miniatur. Obserwowano także przekroje powierzchni definiowanych przez macierze cyfrowego zapisu obrazów oraz histogramy obrazów. W wyniku tych obserwacji stwierdzono m.in.:

- istotne różnice poziomu jasności między grupami 1 i 2,
- nierównomierność (kulistość) jasności pola obrazów grupy 2,
- drgania obrazów,
- fluktuacje średniej jasności tła w ramach sekwencji,
- różnice średniej jasności tła między sekwencjami,
- niezgodność kierunku krawędzi obrazu z kierunkiem śladów tarcia.

Dodatkowo stwierdzono trudności w badaniach śladów materiału SM-2, które są bardzo słabo rozróżnialne na tle tekstury tarczy ze względu na jasną barwę i półprzezroczystość materiału.

5. Przetwarzanie wstępne i korekta obrazów

W przetwarzaniu wstępnym można eliminować wymienione powyżej wady i zakłócenia obrazów jednak wskazana jest ostrożność i opieranie się na mocnym uzasadnieniu gdyż w pewnych przypadkach może to spowodować zniekształcenie lub zafałszowanie zawartych w obrazach informacji. W szczególności ważne jest odróżnienie błędów systematycznych, wymagających ustalonej korekcji grupowej, od zakłóceń o charakterze losowym.

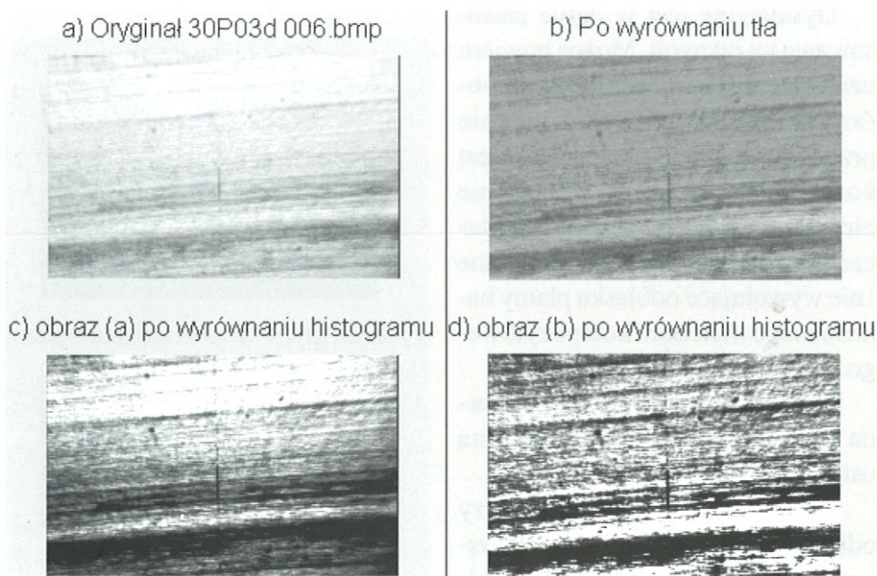
5.1. Korekta nierównomierności przestrzennej jasności obrazu

Ryzyko nieuzasadnionego użycia korekty nierównomierności przestrzennej jasności obrazu czyli operacji wyrównywania tła (zwanej też operacją wyrównywania cienia) pokazano poniżej.

Rysunek 4a prezentuje przykładowy obraz z grupy 2. Nierównomierność jasności jego tła – wynikająca z odbłasku przy zastosowanym kierunku oświetlenia – jest szczególnie widoczna po zwiększeniu kontrastu przy pomocy operacji wyrównywania histogramu (rysunek 4c). Celowe jest usunięcie tej nierównomierności gdy uzna się ją za błąd procesu akwizycji. Po zastosowaniu operacji wyrównywania tła – opisaną w tablicy 2 – otrzymano obraz pokazany na rysunku 4b i jego wersję o zwiększonym kontraście na rysunku 4d

Rysunek 5 przedstawia wykresy pionowego przekroju (czyli kolumny macierzy):

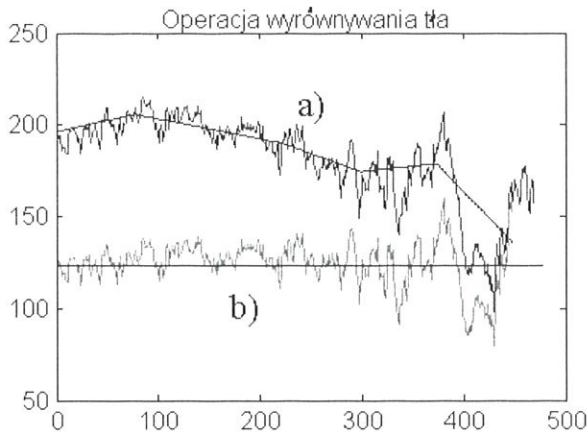
- a) obrazu z rysunku 4a czyli przed operacją wyrównywania tła, przy czym zaznaczono także łamaną



Rysunek 4. Przykładowy obraz o nierównomiernej jasności tła i jego wyrównanie. (The example image of non-uniform background and results of its correction).

Tablica 2. Realizacja korekty nierównomierności jasności tła w Matlabie. (Correction of background brightness non-uniformity in Matlab).

Zapis w Matlabie	Objaśnienie
$A = \text{double}(\text{imcrop}(A1, [1, 1, 703, 447]));$	przycięcie obrazu tak aby okno 64x64 mieściło się w nim całkowitą liczbę razy
$BA = \text{blkproc}(A, [64, 64], 'median(x(:)');$	w każdym oknie 64x64 wyznaczana jest mediana jako umowny poziom tła
$P = \text{imresize}(BA, [448, 704], 'bicubic');$	na wyznaczonych tak „słupkach” rozpinana jest „powierzchnia tła” P
$B = (A - P) + 128;$	powierzchnia P zastaje odjęta od obrazu a zamiast niej dodany stały poziom 128



Rysunek 5. Przekroje pionowe obrazów: a) z rysunku 4a b) z rysunku 4b – czyli po operacji wyrównania tła. (Profiles of vertical cross-sections of images: a) from figure 4a, b) from figure 4b – after the background correction).

linię median wyznaczanych w przedziałach o długości 64 piksele,

b) obrazu z rysunku 4b czyli po operacji wyrównania tła.

Operacja wyrównywania tła okazała się jednak zbędna w przypadku obrazów z grupy 1 a jej ewentualne zastosowanie mogło wręcz spowodować zafałszowanie wyników co pokazuje rysunek 6.

Dyskusyjne jest w ogóle zastosowanie tej operacji. Można bowiem uznać, że odbłask widoczny na obrazach jest powodowany jedynie przez czystą powierzchnię stali i jest korzystny bo czyni tą powierzchnie niemal niewidoczną a na jej tle jeszcze bardziej uwydatniają się ciemne i nie wywołujące odbłasku plamy naniesionego materiału kompozytowego.

Z drugiej strony nierównomierna jasność obrazu jest ewidentną usterką.

Osobną sprawą jest zbadanie czy odbłask ten ma charakter błędu systematycznego, gdyż wówczas mógłby być usuwany na podstawie obrazów czystej tarczy, zarejestrowanych

przed tarciami co zlikwidowałyby ryzyko zaliczania większych plam (w operacji wyrównywania tła) do obszarów gorzej oświetlonych. Dla zbadania tego sporządzono wykresy warstwowe (rysunek 7) powierzchni tła P (patrz tablica 2) dla obrazów referencyjnych (zarejestrowanych bez tarcia). Obrazy wykazują podobieństwo bo na każdym z nich widać zawsze dwa maksima chociaż wykazują one przemieszczanie się w czasie, co może wynikać z drgań tarczy lub fluktuacji błysku oświetlacza.

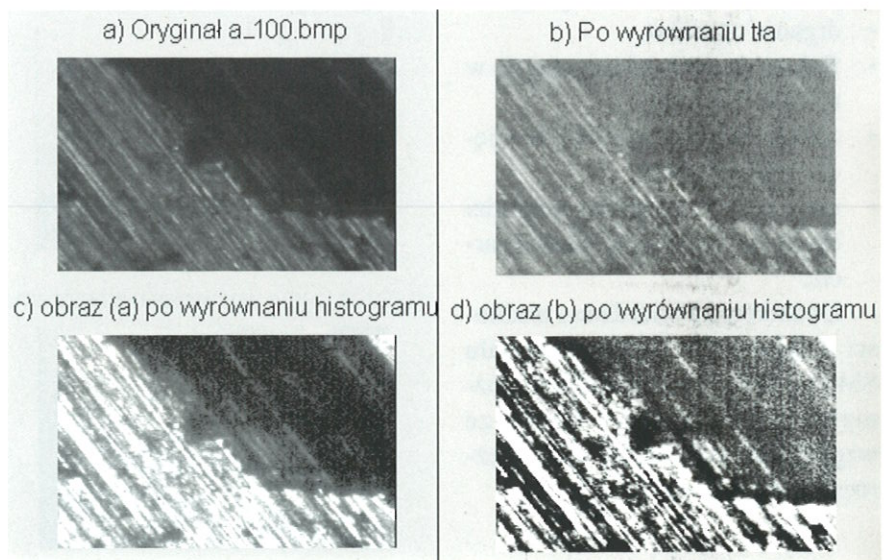
Ostatecznie przyjęto większe okno medianizacji (110x120 pikseli zamiast 64x64) co wygładziło i „uogólniło” powierzchnię tła. Następnie wyznaczono powierzchnie tła dla serii 20-tu obrazów czystej tarczy a z nich przez uśrednienie wyznaczono jedną powierzchnię. Tak otrzymaną powierzchnię (rysunek 8) odejmowano od obrazów grupy 2, a dodawano wartość 127 (poziom średniej szarości).

5.2. Inne korekty

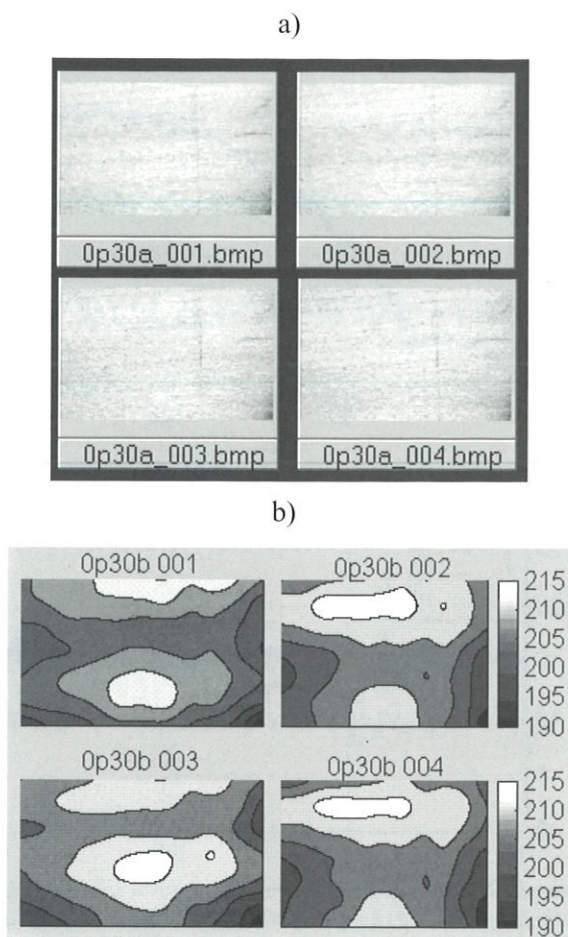
Fluktuacje jasności tła zachodzące w czasie nie były korygowane na poziomie obrazów źródłowych lecz kompensowano te zakłócenia na dalszych etapach przetwarzania przez zastosowanie adaptacyjnego programu binaryzacji – przy badaniu pola plam, oraz stabilizacji jasności obrazów zapewniającej stałą wartość ich median – przy wizualizacji przemieszczeń skupisk plam.

Kolejną korektą było obracanie obrazów z grupy 2 w celu uzyskania poziomego kierunku śladów tarcia.

Drobne przemieszczenia pola widzenia (rzędu kil-



Rysunek 6. Przykład niezasadzonego zastosowania wyrównania tła. (The example of harmful use of background correction).



Rysunek 7. Obrazy czystej powierzchni tarczy (a) oraz ich mapy warstwiczne (b). (The images of clear disk surface (a) and their contour graphs (b)).

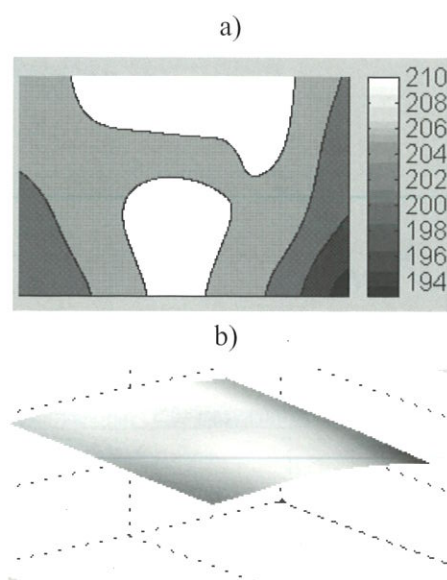
ku do kilkunastu pikseli) zachodzące w sekwencjach obrazów (obserwowane jako drgania obrazu) – skutecznie kompensowane w poprzednich badaniach (Rudnicki 2003 b) – z założenia nie były w niniejszej serii badań korygowane ponieważ nie stosowano metod różnicowych bardzo wrażliwych na te zakłócenia.

6. Analiza pokrycia powierzchni przenoszonym materiałem

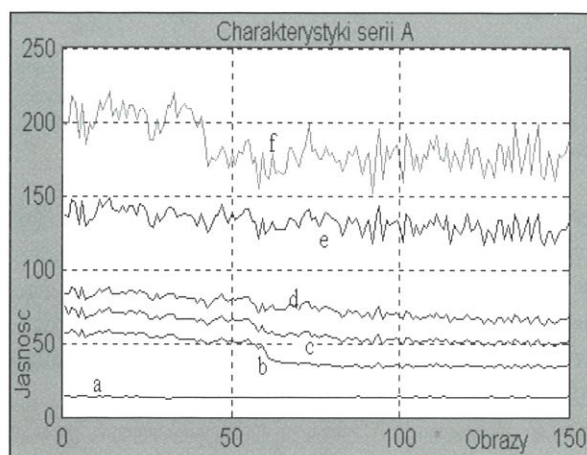
Dla oceny stopnia pokrycia powierzchni przenoszonym materiałem przetworzono obrazy na czarno-białe – czyli dokonano ich binaryzacji – a następnie wyznaczono stosunek procentowy liczby czarnych pikseli do pola obrazu wyrażonego w pikselach.

Poszczególne obrazy w sekwencji różniły się jasnością co pokazuje rysunek 9 na przykładzie sekwencji A.

Fluktuacje te wynikały najprawdopodobniej z niestabilnej intensywności błysków oświetlacza i uniemożliwiały zastosowanie stałego progu binaryzacji (stanowiącego granicę między tym co ma być uznane za czarne lub białe). Próbowano więc różnych sposobów uzależnienia progu binaryzacji od parametrów



Rysunek 8. a) warstwice, b) powierzchnia uśrednionego tła dla obrazów grupy 2. (Contour and surface plots of average background for images of group 2).



Rysunek 9. Charakterystyki serii A: a) minima obrazów, b) mediana z minimów kolumn, c) przyjęty próg binaryzacji, d) mediany obrazów, e) mediany z maksimumów kolumn, f) maksima obrazów. (Series A characteristics: a) minimums of images, b) medians of minimums of columns, c) accepted binarization level, d) medians of images, e) medians of maximums of columns, f) maximums of images).

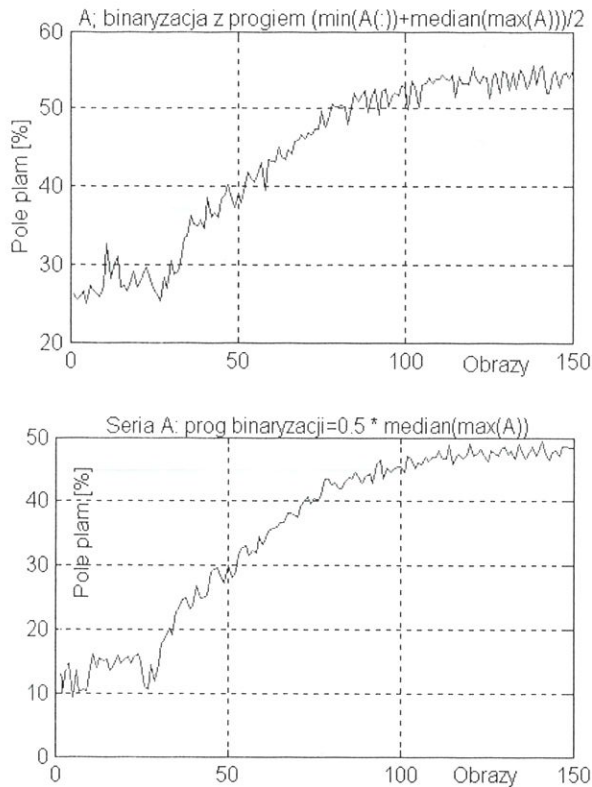
statystycznych obrazu (rys. 10).

Ostatecznie przyjęto adaptacyjny próg binaryzacji p (rysunek 9c) określony wyrażeniem:

$$p = k_b \cdot (\text{mediana obrazu} + \text{mediana z minimów kolumn obrazu})$$

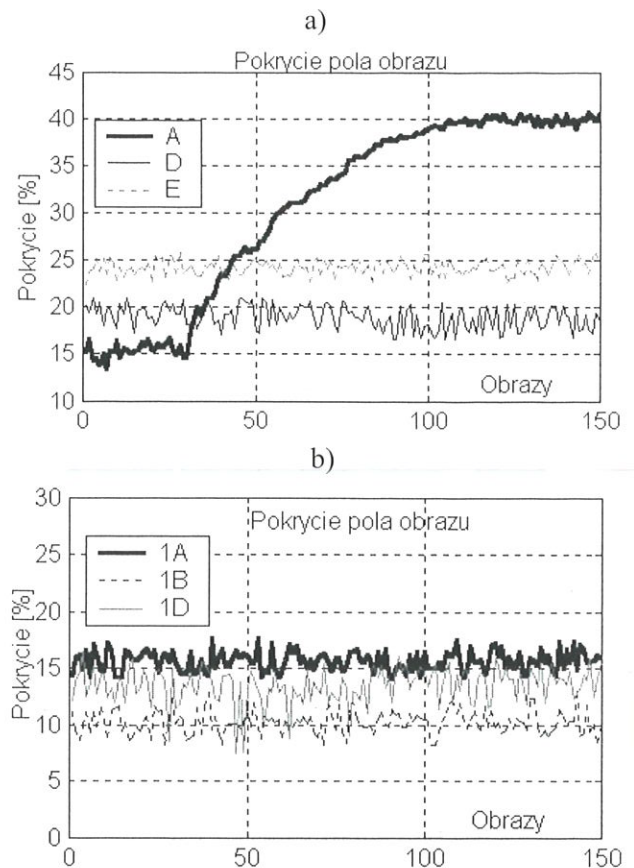
gdzie k_b to współczynnik o wartości bliskiej 0,5, korygowany eksperymentalnie.

Przebieg procentowego pokrycia obszaru obrazów ciemnymi plamami filmu transferowego wyznaczonego przy tak zdefiniowanym progu pokazuje rysunek 11. Jak widać udało się zminimalizować wpływ fluktuacji oświetlenia. Otrzymany przebieg popraw-



Rysunek 10. Rozwój pola plam określany przy różnych wariantach definiowania adaptacyjnego progu binaryzacji. (The growth of dark areas detected in methods with different definitions of adaptive binarization level).

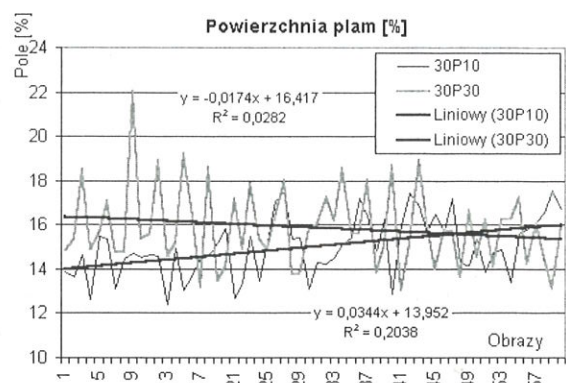
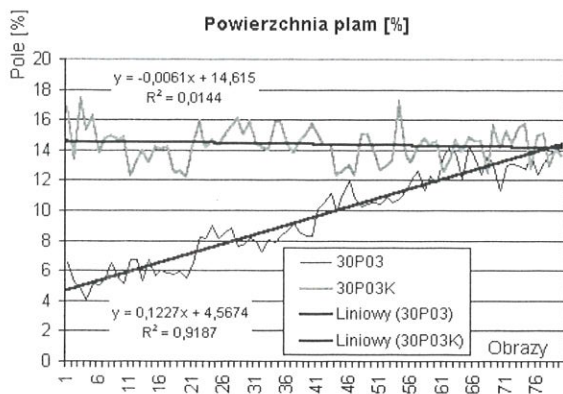
nie odwzorowuje rozwój dużej ciemnej plamy, obserwowany w animowanej sekwencji obrazów sporządzonej dla serii A i zbadany wcześniej innymi metodami (Rudnicki 2003a, b). Otrzymane wyniki są jednak typu jakościowego, dlatego wartości liczbowe należy traktować jako orientacyjne.



Rysunek 11. Zmiany pola filmu transferowego w sekwencjach obrazów grupy 1. (The changes of transfer film area at image sequences of group 1).

Przebieg zmian pola plam dla sekwencji obrazów z grupy 2 pokazano na rysunku 12.

Ocena wyników metody „binaryzacji adaptacyjnej”:



Rysunek 12. Zmiany pola filmu transferowego w sekwencjach grupy 2. (The changes of transfer film area at image sequences of group 2).

Tablica 2. Jakościowa ocena zmian pola filmu transferowego w badanych sekwencjach. (Quality evaluation of transfer film changes at investigated image sequences).

Sekwencja:	A	D	E	1A	1B	1D	30P03	30P03K	30P10	30P30
Ocena jakościowa zmian	znaczący wzrost ok. 25%	fluktuacje ± 3%	fluktuacje ± 3%	fluktuacje ± 3%	fluktuacje ± 3%	fluktuacje ± 3%	wzrost ok. 10%	fluktuacje ± 2%	b. wolny wzrost ok. 2%	fluktuacje ± 3%

- Metoda jest znacznie prostsza, bardziej stabilna i wymagająca mniej czasu obliczeń niż poprzednio stosowane,
- Jest niewrażliwa na drgania obrazu (inaczej niż metody różnicowe),
- Wadą jest zaliczanie najciemniejszych stałych elementów tła do pola plam filmu transferowego oraz zależność składowej stałej wyników od wartości współczynnika k_b .

7. Badanie zmian wielkości i położenia skupisk przeniesionego materiału

W celu zbadania zmian wielkości i położenia skupisk przeniesionego materiału, po zastosowaniu opisanych wyżej korekt i binaryzacji, wyznaczano udział czarnych pikseli w poszczególnych kolumnach obrazów.

Niech X oznacza macierz trójwymiarową stanowiącą cyfrowy zapis sekwencji obrazów szarych po korekcji:

$$X = \{X_{w,k,i}; 0 \leq X_{w,k,i} \leq 255, i = 1 \dots Lx, k = 1 \dots Lk, w = 1 \dots Lw\}$$

gdzie:

$i = 1 \dots Lx$ – numer obrazu, Lx – liczba obrazów w sekwencji,

$k = 1 \dots Lk$ – numer kolumny, Lk – liczba kolumn macierzy obrazu

$w = 1 \dots Lw$ – numer wiersza, Lw – liczba wierszy macierzy obrazu,

$X_{w,k,i}$ – piksel i -tego obrazu sekwencji lub inaczej wksel (piksel trójwymiarowy).

Obrazy szare poddano binaryzacji negatywowej otrzymując macierz trójwymiarową B:

$$B_{w,k,i} = \begin{cases} 0 & \text{dla } X_{w,k,i} \geq p_i \\ 1 & \text{dla } X_{w,k,i} < p_i \end{cases}$$

gdzie:

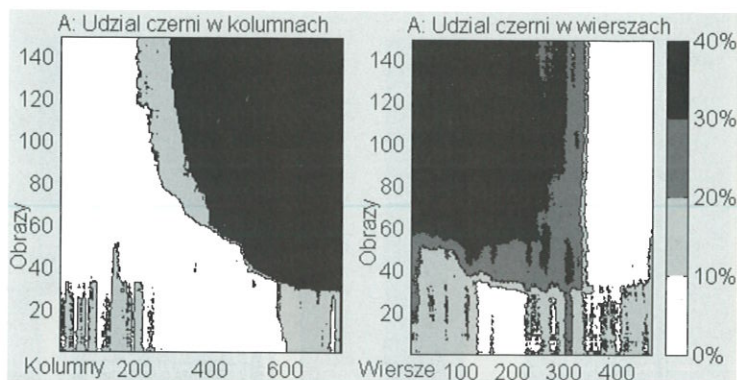
$$p_i = k_b \cdot (\text{median}(Xi) + \text{median}(\min(Xi))), \text{ przyjęto: } k_b = 0,51.$$

Dla każdego obrazu wyznaczono wektor UCK_i procentowego udziału czarnych pikseli w każdej kolumnie obrazu oraz analogiczny wektor UCW_i procentowego udziału czarnych pikseli w każdym wierszu, co dla całej sekwencji skutkowało powstaniem następujących dwu macierzy:

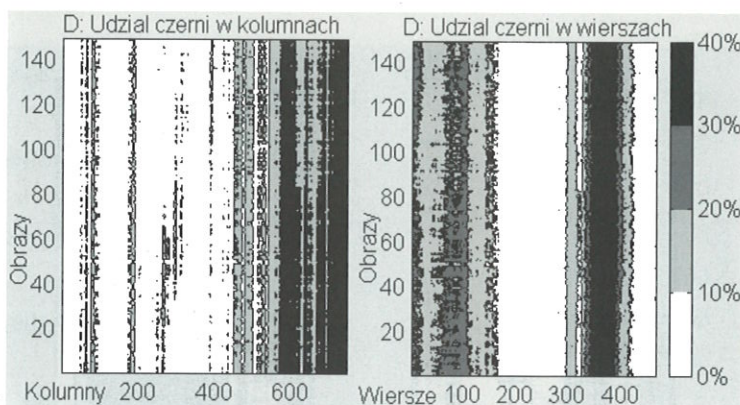
$$UCK_i = \frac{100}{Lw} \cdot \sum_w B_{w,k,i} \quad UCW_i = \frac{100}{Lk} \cdot \sum_k B_{w,k,i}$$

Uzyskane przebiegi przedstawiono na rysunkach 13 do 20.

W sekwencji A (rysunek 13) widoczny jest rozwój dużej ciemnej plamy w prawej (ostatnie kolumny) i



Rysunek 13. Udział czarnych pikseli w kolumnach i wierszach obrazów sekwencji A. (The share of black pixels in columns and rows of image sequence A).



Rysunek 14. Udział czarnych pikseli w kolumnach i wierszach obrazów sekwencji D. (The share of black pixels in columns and rows of image sequence D).

górnej (pierwsze wiersze) części obrazów. Widać też jak wielkość plamy przekraczająca rozmiar połowy obrazu obniża próg binaryzacji co powoduje zanik widoczności drobnych plam.

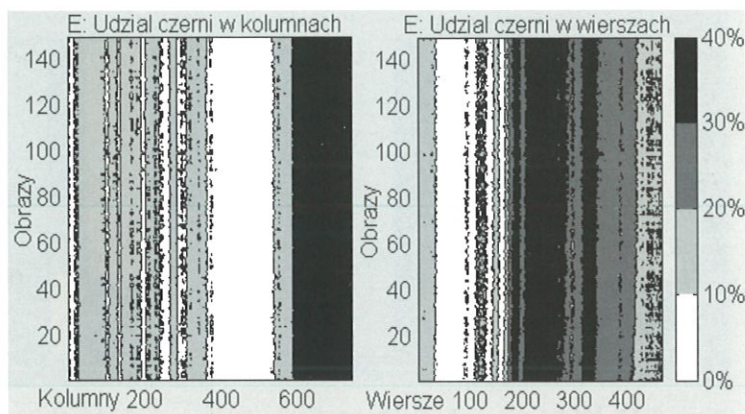
W sekwencji D (rysunek 14) dominują stałe elementy tła. Tylko kilka małych plam zanika a zamiast nich pojawiają się inne.

W sekwencji E (rysunek 15) brak istotnych zmian. Zachodzą jedynie drobne zmiany typu fluktuacyjnego wynikające z losowych zakłóceń oświetlenia i procesu akwizycji.

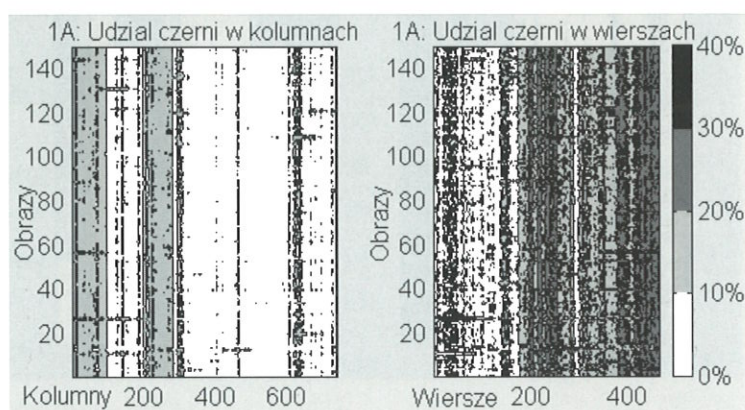
W sekwencji 1A (rysunek 16) dominują stałe elementy tła aczkolwiek widać też pojawianie się na krótkie momenty nietrwałych plam.

W sekwencji 30P03 (rysunek 17) widoczna jest linia odpowiadająca szczelinie pokazywanej na obrazach. Po pierwszych 20 obrazach wyraźne obniżenie skupisk plam na obrazach (z wierszy 250-310 do 380-440). Poza tym w pierwszych 40 obrazach zmiany niewielkie. W kolejnych obrazach widać rozwój i zanik plam, asymetrycznie względem szczeliny.

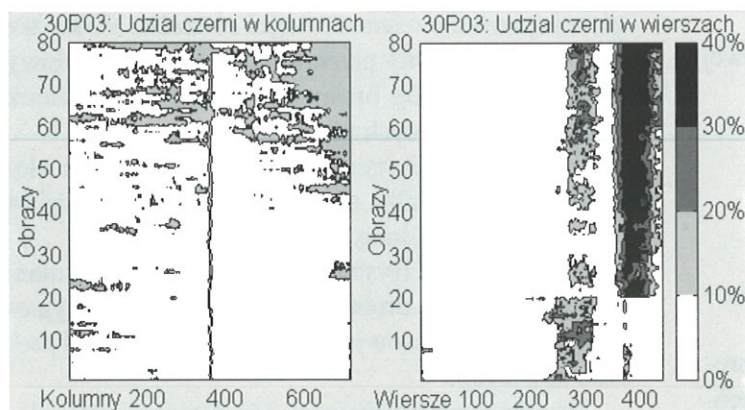
W sekwencji 30P10 (rysunek 18) przebieg ma podobny charakter jak w 30P03 lecz nieco większa jest



Rysunek 15. Udział czarnych pikseli w kolumnach i wierszach obrazów sekwencji E. (The share of black pixels in columns and rows of image sequention E).



Rysunek 16. Udział czarnych pikseli w kolumnach i wierszach obrazów sekwencji 1A. (The share of black pixels in columns and rows of image sequention 1A).



Rysunek 17. Udział czarnych pikseli w kolumnach i wierszach obrazów sekwencji 30p03. (The share of black pixels in columns and rows of image sequention 30p03).

trwałość plam oraz ich równomierność w poziomie natomiast w pionie następuje jeszcze większa koncentracja w dolnych partiach obrazów.

W sekwencji 30P30 (rysunek 19) przebieg jest podobny jak 30p10 lecz jeszcze bardziej ustabilizowany co do umiejscowienia w dolnych partiach obrazu i wykazujący dynamiczne zmiany w pasach po-

ziomych.

Sekwencja 30P03K (rysunek 20) rejestrowana jako ostatnia – wykazuje szereg drobnych zmian mogących w znacznym stopniu wynikać z losowych zakłóceń procesu akwizycji oraz pewną liczbę zmian podobnych jak w serii 30P10 lecz złożonych z mniejszych plam.

8. Podsumowanie

W pracy analizowano obrazy zarejestrowane w trakcie tarcia badanych materiałów polimerowych o stalową tarczę. Badano charakter zmian ciemnych plam materiału polimerowego nanoszonego na powierzchnię stali.

Zastosowano metody pokazujące zmiany sumarycznego pola tych plam a także metody pozwalające analizować zmiany sum rzutów ciemnych punktów na oś poziomą oraz pionową w funkcji czasu (numerów obrazów) i dzięki temu badać wielkość i czas trwania powstających i zanikających plam. Analiza ma charakter głównie jakościowy, gdyż wprawdzie przyjęto miary procentowe jednak dokładniejsza ocena ilościowa wymagałaby wcześniejszego wyskalowania metod.

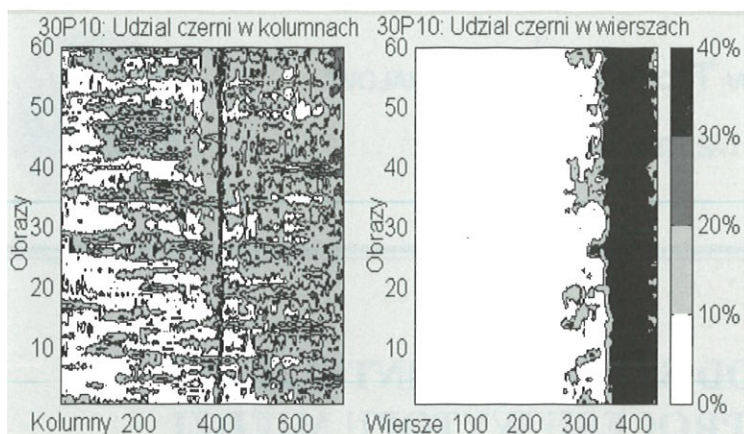
9. Wnioski z dziedziny tribologii

Ocenę utrudniały zarówno zakłócenia i usterki procesu akwizycji jak i fakt, że tylko niektóre materiały badano rozpoczynając od czystej tarczy.

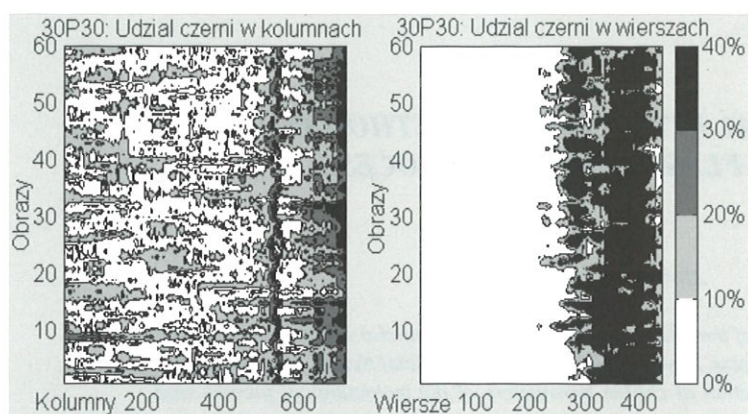
- Dla materiału SM-2 (czysty tarflen) zaobserwowano powstawanie bardzo krótkotrwałych plam natychmiast zanikających co może świadczyć o odpadaniu cząstek materiału w zastosowanych warunkach pracy cierno-ślizgowej.
- Materiał SM-K22G3 w serii A tworzył narastające i utrzymujące się w miarę stabilne plamy „filmu transferowego” przy większej chropowatości ($R_a = 0,3$).
- W drugiej serii badań – prawdopodobnie ze względu na znacznie mniejszą chropowatość tarczy stalowej ($R_a = 0,03$) zaobserwowano losową zmienność plam, które zaczęły powstawać przy nacisku 30 N i prędkości ślizgania 0,3 m/s. Tak więc przy zbyt dużej gładkości tarczy brak stabilnej warstwy filmu a tym samym może występować większe zużycie.

Wnioski odnośnie dalszych badań:

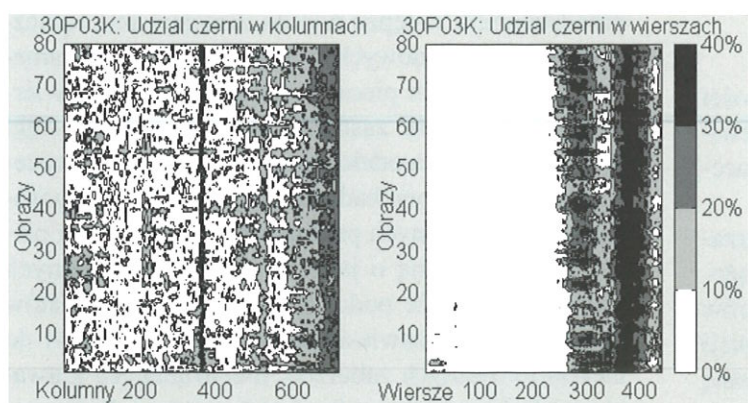
- Konieczne jest przebadanie kilku innych



Rysunek 18. Udział czarnych pikseli w kolumnach i wierszach obrazów sekwencji 30p10. (The share of black pixels in columns and rows of image sequence 30P10).



Rysunek 19. Udział czarnych pikseli w kolumnach i wierszach obrazów sekwencji 30p30. (The share of black pixels in columns and rows of image sequence 30P30).



Rysunek 20. Udział czarnych pikseli w kolumnach i wierszach obrazów sekwencji 30p03K. (The share of black pixels in columns and rows of image sequence 30P03K).

tworzy kompozytowych co dostarczy materiału prównawczego.

- Należy dążyć szczególnie do wykrycia warunków powstawania najbardziej korzystnej stabilnej i quasi-równomiernej warstwy filmu transferowego przy zastosowaniu odpowiedniej (nie zbyt małej) chropowatości tarczy i stosowaniu standardowego czyszczenia tarczy przed każdym badaniem lub rejestrowaniem obrazów na których widoczna byłaby także część tarczy nie podlegająca tarcii.

10. Literatura

- Franklin S.E., de Kraker A., 2003, Investigation of counterface surface topography effects on the wear and transfer behaviour of a POM-20% PTFE composite. *Wear*, 255, 766-773.
- Oleksiak Z., 1993, Urządzenie do testowania tworzyw konstrukcyjnych na tarcie i zużywanie. *XVI Sympozjon PKM, Komunikaty*, Politechnika Warszawska, W-wa.
- Podsiadlo P., Stachowiak G.W., 2000, Scale invariant analysis of wear particle morphology. *Wear*, 242, 160-179.
- Podsiadlo P., Stachowiak G.W., 1999, Application of Hurst orientation transform to the characterization of surface anisotropy. *Tribology International*, 32, 387-392.
- Rudnicki Z., 2003a, Analiza sekwencji obrazów niejednorodnych. *Informatyka w Technologii Materiałów*. Nr 2, tom 3.
- Rudnicki Z., 2003b, Analiza subtelnych zmian obrazów w warunkach błędów procesu akwizycji. *Mat. Krajowej Konferencji MSK'03 - Metody i Systemy Komputerowe*. Kraków. 26-28.XI.2003.
- Rymuza Z., 1986, *Trybologia polimerów ślizgowych*. WNT. Warszawa.
- Stachowiak G.W., Batchelor A.W., 2001, *Engineering Tribology*. Butterworth-Heinemann. USA.
- Stachowiak G.W., 1998, Numerical characterization of wear particles morphology and angularity of particles and surfaces. *Tribology International*, 31, No1-3, 139-157.
- Umeda A., Sugimura J., Yamamoto Y., 1998: Characterization of wear particles and their relations with sliding conditions. *Wear*, 216, 220-228.

Pracę otrzymano 27 czerwca 2005 r.

