

Zbigniew Rudnicki\*

## **Analiza sekwencji obrazów śladów tarcia ślizgowego kompozytów PTFE**

### **1. Wprowadzenie**

Wśród materiałów konstrukcyjnych istotną rolę pełnią kompozyty polimerów, a w szczególności (PTFE) poli-tetra-fluoro-etylenu, znanego m.in. pod fabrycznymi nazwami „teflon” i „tarflen”. Główne zalety PTFE to bardzo niski współczynnik tarcia oraz odporność chemiczna na niemal wszystkie substancje, natomiast wadą jest niewielka odporność na ścieranie. Dla poprawienia wytrzymałości mechanicznej i innych parametrów produkuje się kompozyty PTFE zawierające wypełniacze i dodatki takie, jak węgiel, włókno szklane, brąz i inne. Kompozyty te są stosowane do produkcji elementów maszyn pracujących ślizgowo (łożysk, pierścieni uszczelniających tłoki i in.). Podczas współpracy ślizgowej kompozytów PTFE z powierzchnią stali występuje zjawisko transferu materiału, a dokładniej nanoszenia cząsteczek PTFE na powierzchnię stali. Naniesiona warstwa nazywana jest „filmem transferowym” (*transfer film*) [6, 7]. Jest ona (w przypadku PTFE) czynnikiem korzystnym – zmniejszającym tarcie i zwiększającym odporność na zużycie – szczególnie gdy jest *stabilna i jednolita* [1]. Bardzo nieliczne są badania wykorzystujące metody komputerowej analizy dla obrazów powierzchni w procesie tarcia. Jedną z takich prac [9] opisuje wykorzystanie dwu cech obrazów teksturowych szarych do charakterystyki powierzchni po tarcu.

Proces tworzenia i przebiegu zmian filmu transferowego w trakcie tarcia ślizgowego badano przy użyciu metod analizy obrazów w ramach grantu KBN 7T07C 03318 „Metodyka szybkiego oznaczania parametrów trybologicznych tworzyw konstrukcyjnych, współpracujących ślizgowo w wybranych ośrodkach gazowych lub w próżni”. Autor dziękuje kierownikowi tego projektu badawczego dr. inż. Z. Oleksiakowi za udostępnienie obrazów i wyników tribologicznej części badań. W publikacjach [3, 4, 5] przedstawiono wcześniejsze etapy badań, natomiast niniejsze opracowanie omawia badania ostatnio prowadzone.

### **2. Cel i przedmiot badań**

Celem opisywanego fragmentu badań było zbadanie przebiegu powstawania i zmian filmu transferowego w trakcie tarcia, dla kilku materiałów kompozytowych przy różnych

---

\* Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

wartościach sił nacisku oraz prędkości ślizgania, i wychwycenie charakterystycznych różnic tych przebiegów.

Przedmiotem badań tribologicznych były próbki czterech materiałów kompozytowych wyprodukowanych w Zakładach Azotowych w Tarnowie i przedstawionych w tabeli 1. Pole powierzchni trącej próbek wynosiło  $S = 1\text{cm}^2$ .

**Tabela 1**  
Badane materiały

Nazwa materiału	Skład
SM-K22G3	PTFE + 22% koksu + 3% grafitu
SM-2 lub PTFE	czysty PTFE
SM-B40G2	PTFE + 40% brązu + 2% grafitu
SM-S25	PTFE + 25% włókna szklanego

Badania prowadzone były na stanowisku wyposażonym w tribotester OSA-2 typu trzpień-tarcza (*pin-on-disc*), w którym trzpień, czyli próbka badanego materiału jest dociskana z określoną siłą do wirującej tarczy stalowej stanowiącej przeciwpróbkę. Oprócz siły docisku rejestrowana była także prędkość obrotowa tarczy oraz temperatura wewnątrz próbki w pobliżu powierzchni trącej. W trakcie tarcia prowadzona była rejestracja obrazów wybranego fragmentu tarczy zawierającego ślad tarcia, za pomocą mikroskopu z zamontowanym oświetlaczem błyskowym i kamerą cyfrową, przekazującą sygnał do komputera [2]. Momenty rejestrowania obrazów były zsynchronizowane z obrotami tarczy, co pozwoliło utrwalić sekwencje prezentujące ten sam wycinek tarczy. Przy stosowanym powiększeniu 60-krotnym pole obserwacji wynosiło  $1,2 \times 2$  mm.

Bezpośrednim obiektem badań w zakresie analizy obrazów były dostarczone przez zespół tribologów, a zarejestrowane w trakcie tarcia sekwencje obrazów cyfrowych szarych (pliki typu BMP) o nominalnie 256 poziomach szarości i rozmiarach  $744 \times 468$  pikseli, z których w pewnych przypadkach obcinano marginesy wykraczające poza ślad tarcia. Liczba obrazów w sekwencji wynosiła najczęściej 150, przy czym stosowano również łączenie kilku sekwencji w grupę.

W zapisie formalnym dużymi literami **A**, **B**, **C**, lub ogólnie **X**, oznaczane będą macierze trójwymiarowe stanowiące cyfrowy zapis takich sekwencji:

$$X = [X_i, i = 1, 2..Lx] = [x_{w,k,i}: 0 \leq x_{w,k,i} \leq Lg-1, i = 1, 2..Lx, k = 1, 2..Lk, w = 1, 2..Lw],$$

gdzie:

$$\begin{array}{ll} X_i & - i\text{-ty obraz w sekwencji,} & Lx & - \text{liczba obrazów w sekwencji,} \\ k & - \text{numer kolumny,} & Lk & - \text{liczba kolumn,} \\ w & - \text{numer wiersza,} & Lw & - \text{liczba wierszy,} \\ Lg=256 & - \text{liczba odcieni szarości,} & x_{w,k,i} & - \text{piksel } i\text{-tego obrazu sekwencji, czyli} \\ & & & \text{voksel (piksel trójwymiarowy).} \end{array}$$

Przy rozpatrywaniu pojedynczego obrazu pomijany będzie jego numer.

Nazwy plików dyskowych z obrazami (np.: SMB40G2\_p20v3\_h\_002.bmp) zawierały:

- nazwę badanego materiału (SMB40G2);
- wartość  $P$  [N] siły nacisku po literze „p”;
- wartość  $v$  [m/s] prędkości ślizgania po literze „v”;
- oznaczenie literowe sekwencji (np.: „h”);
- numer kolejny obrazu w ramach sekwencji,
- typ pliku (.bmp).

Do przetwarzania i analizy obrazów wykorzystano pakiet Matlab w wersji 6 wraz z biblioteką Image Processing Toolbox oraz szereg własnych procedur i funkcji napisanych w Matlabie.

Celem badań w zakresie analizy obrazów było zdefiniowanie oraz wyznaczenie (ekstrakcja) takich cech obrazów, które pozwoliłyby odzwierciedlić przebieg zmian zarówno sumarycznej powierzchni filmu transferowego, jak i jej morfologii w funkcji czasu oraz w funkcji liczby ślizgów, a także próba opisu funkcyjnego tych zmian. W niniejszej publikacji tematykę ograniczono do badań względnego pokrycia powierzchni obrazu plamami filmu transferowego oraz anizotropii tekstury. Ekstrakcja cech została poprzedzona oszacowaniem i (w koniecznych przypadkach) kompensacją błędów i zakłóceń oraz binaryzacją obrazów.

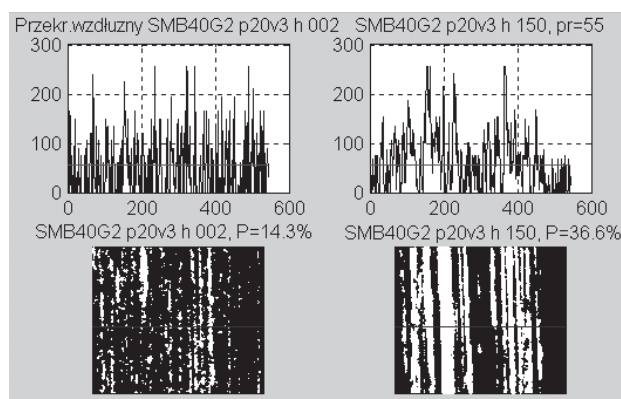
### 3. Problemy akwizycji i oszacowanie zakłóceń

Jednym z podstawowych problemów był fakt, że poszczególne materiały posiadają różne własności optyczne, a w szczególności różnią się barwą. Przykładowo materiał SM-K22G3 jest barwy czarnej dzięki domieszkom koksu i grafitu, natomiast czysty tarflen SM-2 jest bezbarwny i półprzezroczysty. Spowodowało to konieczność przejścia z początkowego rejestrowania obrazów ciemnych plam filmu transferowego w polu jasnym (dla materiału K22G3) na rejestrację jasnych plam w polu ciemnym – przy bocznym oświetleniu. Szereg problemów wynikało też z niedoskonałości układu oświetlającego oraz układu synchronizującego rejestrację obrazów z obrotami tarczy. W efekcie uzyskano ciemne i mało kontrastowe obrazy o zakresie odcieni wykorzystującym mniej niż połowę nominalnego zakresu jasności (0–255).

Obrazy wykazują znaczne zaszumienie widoczne m.in. na obrazach przekrojów (profilu), pokazanych przykładowo na rysunku 1. Na rysunku tym zaprezentowano obrazy wybrane z początku oraz końca pewnej sekwencji, poddane wstępnemu przetwarzaniu (polegającemu na pomnożeniu wartości wszystkich pikseli przez 2) oraz binaryzacji. Na przekrojach obrazów (rys. 1a, b) zaznaczono wstępnie ustalony poziom progu binaryzacji wynoszący 55. Dwa kolejne rysunki (rys. 1c, d) pokazują rezultaty binaryzacji otrzymanej przy tym progu, a także zaznaczono na nich linie, wzdłuż których poprowadzono przekroje pierwotnych obrazów szarych.

Po binaryzacji sekwencji SMB40G2\_p20v3\_h z progiem 55 stwierdzono wzrost pokrycia powierzchni obrazu filmem transferowym ok. 2,6 razy, od wartości 14,3% do 36,6%.

Szum generowany w przetworniku CCD kamery wideo jest wyraźnie widoczny szczególnie przy oglądaniu ciemniejszych sekwencji obrazów.

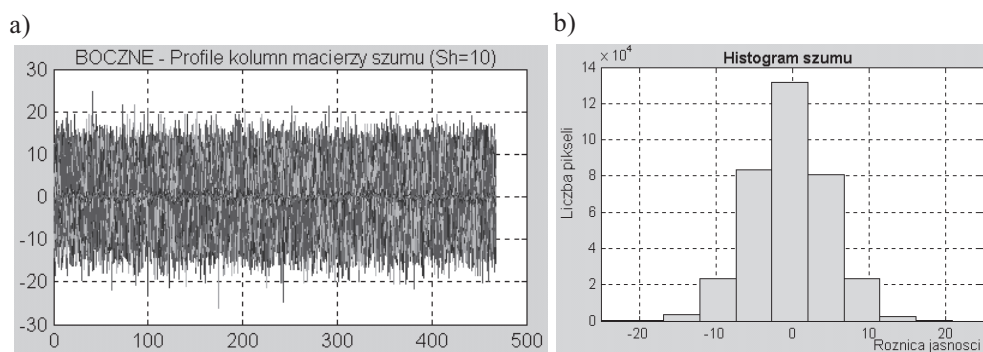


**Rys. 1.** Test binaryzacji obrazów z sekwencji SMB40G2\_p20v3\_h dla progu 55  
Objaśnienia w tekście

W celu ilościowej oceny poziomu szumów przeprowadzono m.in. analizę kilku krótkich serii obrazów nieruchomej tarczy przeciwpróbkowej (7 serii po 5 obrazów), rejestrowanych przy różnych wartościach kąta oświetlenia i związanych z tym różnych średnich jasnościach obrazów.

Macierze szumu  $S_i$  dla danej serii obrazów nieruchomej tarczy otrzymano przez odjęcie obrazu uśrednionego od poszczególnych obrazów danej serii

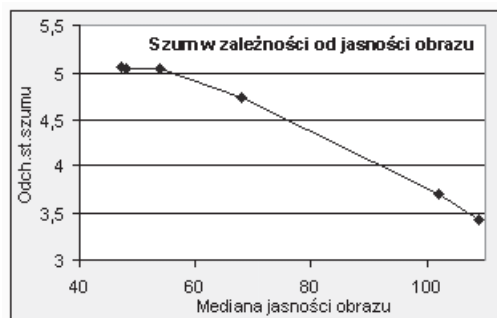
$$S_i = X_i - X_{sr}, \text{ gdzie: } X_{sr} = \frac{1}{Lx} \cdot \sum_{i=1}^{Lx} X_i$$



**Rys. 2.** Szum wybranego obrazu: a) profile kolumn obrazu; b) histogram szumu

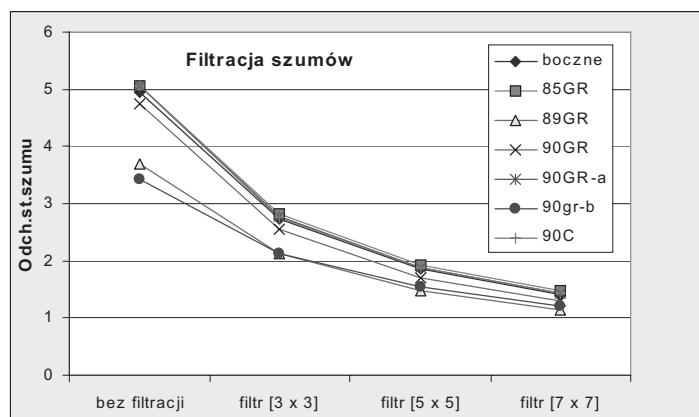
Na rysunku 2 przedstawiono wykresy wartości kolumn (profile) macierzy szumu (rys. 2a) oraz histogram macierzy szumu (rys. 2b), a na rysunku 3 pokazano zależność odchylenia standardowego macierzy szumu dla pierwszego obrazu z każdej serii – od median

jasności tych obrazów, z której wyraźnie widać, jak maleje poziom szumu wraz ze wzrostem wartości jasności obrazów. Widać także przybliżoną zgodność rozstępu szumu gaussowskiego (rys. 2a) z teoretycznym zakresem  $(-3\sigma, 3\sigma)$ , gdzie  $\sigma$  to odchylenie standardowe równe 5,1.



Rys. 3. Zależność odchylenia standardowego macierzy szumu od jasności obrazów

Dla zmniejszenia tak znacznego poziomu szumu, niezbędne było zastosowanie filtracji. Zastosowano dwuwymiarowy filtr medianowy realizowany w Matlabie funkcją medfilt2. Filtracja ta wymaga zdefiniowania wymiarów okna medianizacji OM, które będzie przemieszczane po całym obrazie. Piksele obrazu wynikowego wyznaczone są jako mediany zbioru pikseli sąsiednich mieszczących się w granicach OM. Skuteczność filtracji rośnie wraz z powiększaniem OM, jednak skutkiem ubocznym jest wzrost rozmycia obrazu wynikowego.



Rys. 4. Skuteczność filtracji medianowej dla różnych rozmiarów okna medianizacji

Rysunek 4 pokazuje zależność tłumienia szumu w badanych obrazach od zastosowanych rozmiarów okna filtra medianowego. Stwierdzono wytłumienie szumu o ponad 50% przy oknie medianizacji  $5 \times 5$  i znacznie słabszy spadek przy dalszym powiększaniu tego okna.

Dlatego też dla obrazów o rozmiarach oryginalnych filtrację medianową z oknem  $5 \times 5$  uznano za optymalną. W przypadku zmniejszania (skalowania) obrazów (dla przyspieszenia analizy) wystarczającą była filtracja medianowa z oknem  $3 \times 3$ .

Badano i kompensowano również drgania obrazów i inne zakłócenia oraz błędy, jednak z braku miejsca zagadnienia te pominięto w niniejszym opracowaniu.

#### 4. Analizowane cechy obrazów binarnych

Przed analizą obrazu poddano binaryzacji progowej opisanej w następnym rozdziale. Przekształcenie obrazów szarych na czarno-białe – uwydatniające zmiany zachodzące w procesie tarcia – pozwoliło bowiem zastosować znacznie wydajniejsze metody analizy niż testowana we wstępnych etapach badań [3] ekstrakcja cech obrazów szarych.

Dla wyznaczenia cech inwariantnych względem rozmiarów obrazu, wyznaczono najpierw następujące charakterystyki:

- rozmiary obrazu:  $Lw$ ,  $Lk$  oraz liczbę pikseli obrazu:  $N = Lw * Lk$ ;
- liczbę pikseli białych  $Lb$  wyznaczanej w Matlabie jako suma wartości macierzy binarnej obrazu:  $Lb = \text{sum}(\mathbf{XB}(:))$ ;
- współczynniki  $Nx$ ,  $Ny$  reprezentujące liczby przejść z czerni do bieli w wierszach oraz kolumnach:

$$Nx = \sum_{w=1}^{Lw} \sum_{k=2}^{Lk} \text{Step0}(xb_{w,k}, xb_{w,k-1}),$$

$$Ny = \sum_{k=1}^{Lk} \sum_{w=2}^{Lw} \text{Step0}(xb_{w,k}, xb_{w-1,k}),$$

$$\text{Step0}(r, s) = \begin{cases} 1 & \text{dla } r > s \\ 0 & \text{dla } r \leq s \end{cases}$$

Na podstawie wymienionych wyżej parametrów wyznaczono następujące deskrytory cech niezależnych od rozmiarów obrazów:

- względne pokrycie powierzchni obrazu filmem transferowym:  $\text{Pokr} = Lb/N$ ;
- anizotropia tekstury:  $\text{At} = Nx/Ny$ .

Współczynnik  $\text{At}$  zastosowany dla pojedynczych plam określa stosunek ich rzutów w kierunkach  $y$  i  $x$  ( $90^\circ$  i  $0^\circ$ ), przy czym dla plam wklęsłych są to rzuty rozwinięte [8]. Współczynnik ten nie pozwala natomiast określać kierunku nachylenia plam ani stopnia wypełnienia prostokąta wyznaczonego przez te rzuty, dlatego pasma wynikające z kierunku tarcia powinny być równoległe do krawędzi obrazu.

Zaproponowano analizę bardzo prostych cech obrazów, intuicyjnie spodziewając się otrzymać dla nich znaczące rezultaty, jak również mając na uwadze bardzo dużą liczbę danych do przetwarzania. Badano również rozkłady wielkości plam filmu transferowego, co zostanie opisane w oddzielnej publikacji.

## 5. Segmentacja obrazów

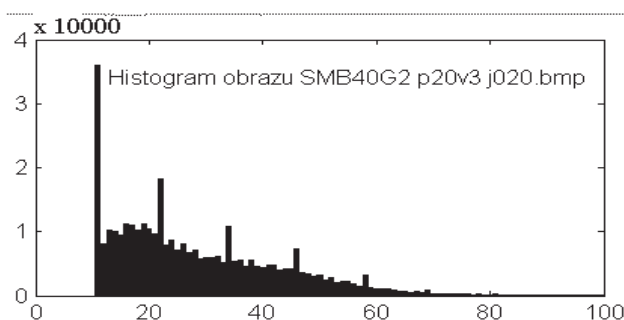
Przed ekstrakcją cech dokonano segmentacji obrazów dla wyodrębnienia obszarów reprezentujących pokrycie powierzchni nanoszonym materiałem kompozytowym w postaci „filmu transferowego”. W przypadku badanych obrazów segmentacja ta sprowadzała się do binaryzacji progowej.

We wcześniejszych badaniach, dla obrazów zmian w jasnym polu, z powodzeniem stosowano binaryzację różnicową [4, 5] odejmując pierwszy obraz sekwencji od pozostałych. Operacja ta poprzedzona była wyznaczeniem wzajemnych przemieszczeń obrazów w sekwencji i dokładnym skorygowaniem tych przemieszczeń jak również fluktuacji jasności. Niestety dla większości obecnie analizowanych sekwencji obrazów, brak stałych motywów na obrazach uniemożliwiał taką kompensację, a więc również uniemożliwiał zastosowanie binaryzacji różnicowej obrazów.

W zastosowanej binaryzacji progowej najistotniejsze było optymalne dobranie progu  $p$ , który jest jedynym parametrem tej operacji. W przypadkach gdy histogram obrazu ma kształt dwumodalny, wówczas zalecane jest w literaturze [8] określanie progu binaryzacji na poziomie szarości stanowiącym granicę („dolinę”) między lokalnymi maksimum histogramu. Niestety histogramy większości badanych obrazów nie wykazywały dwumodalności, co pokazuje rysunek 5.

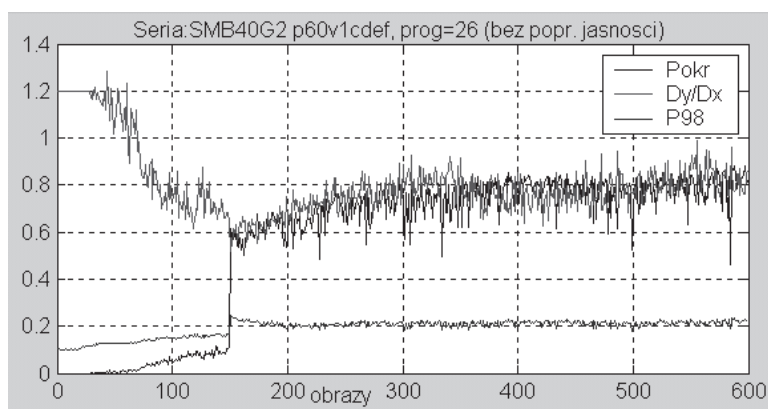
W doborze progów binaryzacji kierowano się następującymi kryteriami:

- K1 – dla sekwencji obrazów wykazującej wzrost powierzchni filmu transferowego optymalny jest próg binaryzacji, dla którego wystąpi maksimum różnicy  $Pokr(Lx) - Pokr(1)$  wartości cechy  $Pokr$  pierwszego i ostatniego obrazu sekwencji;
- K2 – wartość progu musi dostosowywać się do poziomu oświetlenia danej sekwencji obrazów.



Rys. 5. Histogram obrazu z sekwencji SMB40G2\_p20v3

Oprócz losowych fluktuacji oświetlenia wykazywanych na otrzymanych do analizy obrazach, w pewnych przypadkach występowały również – między poszczególnymi sekwencjami – skokowe zmiany oświetlenia o charakterze błędu systematycznego, co powodowało skokowy błąd w przebiegu zmian pokrycia powierzchni (rys. 6). Drugą przyczyną tak znacznego skoku była w pokazanym przypadku przerwa w rejestracji podczas gdy proces tarcia i narastania pokrycia filmem transferowym trwał.



Rys. 6. Przebiegi zmian cech ze skokowym błędem spowodowanym zmianą oświetlenia oraz przerwą w rejestracji

Dla uniezależnienia wyników od zaistniałych między poszczególnymi sekwencjami zmian oświetlenia, po szeregu prób i eksperymentów m.in. na podstawie analizy percentyli obrazów (rys. 7) opracowano następującą metodę wyznaczania progu dla danej sekwencji obrazów:

- dla każdego obrazu  $A = X_i$  przekonwertowanego na wektor wyznaczano indywidualnie próg binaryzacji  $pr(i)$  na podstawie wartości jego percentyli 1% i 99% oraz przyjętego stałego współczynnika  $wsp$  następująco (zapisano w notacji Matlab):

$$pr(i) = \text{round}(wsp * (\text{prctile}(A(:), 1) + \text{prctile}(A(:), 99)))$$

- stały dla całej sekwencji próg binaryzacji  $p$  wyznaczano jako medianę wektora progów indywidualnych  $pr$  a następnie wyznaczano sekwencje obrazów binarnych  $\mathbf{XB}$ :

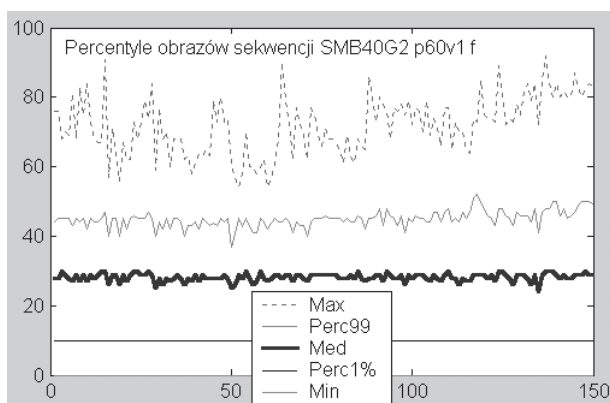
$$p = \text{median}(pr); \quad \mathbf{XB} = [xb_{w,k}]; \quad xb_{w,k} = \begin{cases} 0 & \text{dla } x_{w,k} \leq p, \\ 1 & \text{dla } x_{w,k} > p. \end{cases}$$

Zastosowana metoda różni się od metody Brensena, w której próg wyznaczany jest jako średnia arytmetyczna wartości najjaśniejszego i najciemniejszego piksela obrazu

$$p_B = 0,5 * (\min(\mathbf{A}(:)) + \max(\mathbf{A}(:))).$$



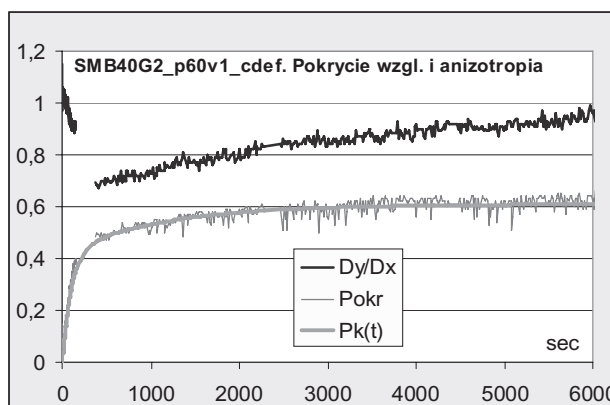
Zastąpienie wartości maksymalnej jasności wartością percentyla 99% pozwoliło w znacznym stopniu (ok. 5 razy) zmniejszyć wpływ losowych fluktuacji na wyznaczany próg, co widać na rysunku 7.



Rys. 7. Przebieg wybranych percentyli dla sekwencji obrazów

Dodatkowo zastosowany współczynnik  $wsp$  umożliwił dobieranie progu zgodnie z podanym wyżej kryterium K1. Dla badanych serii obrazów pasm jasnych w polu ciemnym, dobrana eksperymentalnie (wg kryterium K1) optymalna wartość współczynnika  $wsp$  wyniosła 0,35. Po zastosowaniu tej metody dla grupy sekwencji SMB40G2\_p60v1\_cdef wyznaczono dla poszczególnych sekwencji progi:  $p(c) = 17$ ,  $p(d) = p(e) = p(f) = 23$ .

Po dodatkowym uwzględnieniu przerwy w rejestracji i przejściu na skalę czasu, zdołano radykalnie wyeliminować błędy przebiegów z rysunku 6, uzyskując wykresy przedstawione na rysunku 8.



Rys. 8. Wyniki analizy grupy sekwencji SMB40G2\_p60v1\_cdef dla progu binaryzacji wyznaczanego na podstawie percentyli obrazu

## 6. Analiza sekwencji obrazów

Analizę polegającą na wyznaczeniu wartości opisanych w rozdziale 4 deskryptorów cech obrazów i sporządzaniu wykresów w funkcji czasu oraz liczby ślizgów, realizowano za pomocą opracowanych w Matlabie programów, a także arkusza kalkulacyjnego Ms Excel.

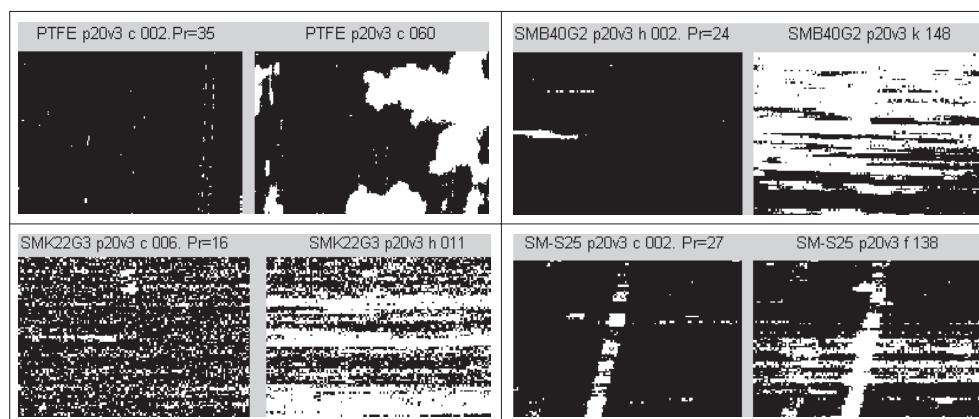
Opracowane w Matlabie programy realizowały m.in. następujące operacje:

- automatyczne generowanie plików tekstowych ze spisami obrazów oraz ich sekwencji w folderach przeznaczonych dla wyników dotyczących poszczególnych materiałów;
- automatyczne wyznaczenie progów binaryzacji dla każdej sekwencji obrazów i zapisywanie ich w pliku PROGL.TXT z możliwością korygowania przez użytkownika;
- przetwarzanie obrazów obejmujące m.in. takie operacje, jak: obcinanie określonych marginesów, obracanie, transpozycja macierzy obrazu, jeśli zadeklarowany kierunek tarcia jest pionowy, binaryzacja progowa, skalowanie (dla przyspieszenia analizy), filtracja medianowa szumu;
- wyświetlanie obrazów o minimalnym oraz obrazu o maksymalnym pokryciu powierzchni filmem transferowym;
- wyświetlanie wykresów przebiegu cech oraz zapisywanie wyników liczbowych do plików tekstowych.

Dodatkowo w Excelu dopasowano do uzyskanych przebiegów aproksymujące je funkcje wykładnicze opisane dalej.

## 7. Wyniki i omówienie wyników analizy

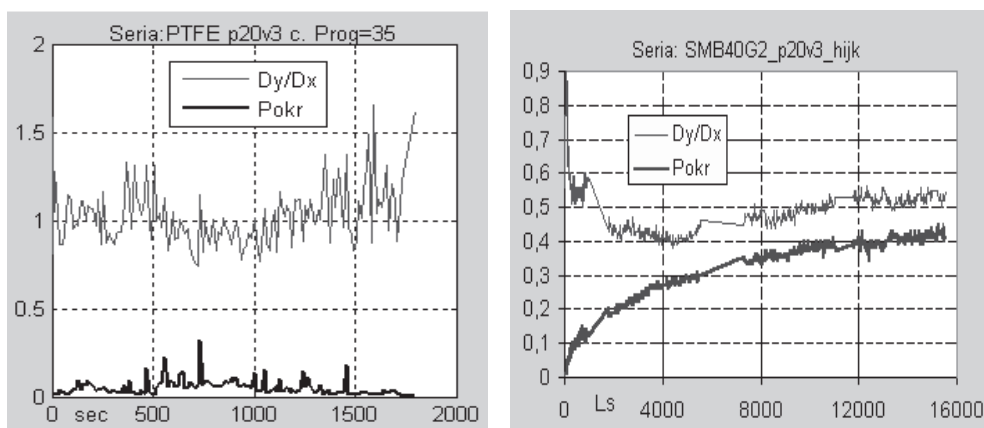
W dotychczas przeprowadzonych badaniach przeanalizowano dla czterech materiałów i dwu (lub trzech) warunków pracy ślizgowej po dwie grupy sekwencji obrazów, czyli łącznie 16 serii liczących najczęściej po 600 obrazów.



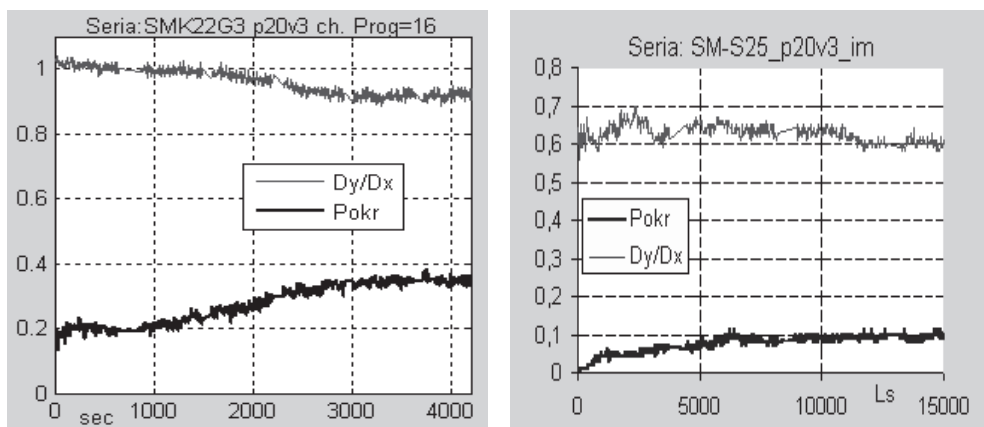
**Rys. 9.** Pary obrazów o najmniejszym i największym pokryciu powierzchni dla czterech badanych materiałów oraz parametrów tarcia:  $P = 20 \text{ N}$ ,  $v = 3 \text{ m/s}$

Przykładowe wyniki w formie graficznej pokazano na rysunku 9, zestawiono parami obrazy o najmniejszym i największym pokryciu powierzchni filmem transferowym w sekwencjach rejestrowanych przy parametrach tarcia:  $P = 20$  N,  $v = 3$  m/s, dla wszystkich czterech badanych materiałów.

Kolejne rysunki (rys. 10 i 11) pokazują natomiast przebiegi zmian badanych cech  $Pokr$  i  $At=Dy/Dx$ , czyli względnego pokrycia i anizotropii tekstury filmu transferowego pozostawianego na powierzchni stali przez badane materiały. Szczególnie wyróżnia się czysty PTFE, który nie tworzy stabilnej warstwy, a na obrazach pojawiają się i natychmiast znikają plamy złuszczonego materiału.



Rys. 10. Charakterystyki sekwencji PTFE\_p20v3\_c oraz SMB40G2\_hijk



Rys. 11. Charakterystyki sekwencji SMK22G3\_p20v3\_ch oraz SM-S25\_p20v3\_im

Stosunkowo stabilną warstwę o względnym pokryciu ok. 40% tworzą materiały SM-B40G2 oraz SM-K22G3 (z dodatkami brązu, grafitu i koksu). Materiał SM-S25 (z włóknem szklanym) wytworzył bardzo skąpe pokrycie ok. 10% powierzchni obrazu.

Jak widać z wykresów – przebiegi anizotropii również są dla poszczególnych materiałów zróżnicowane, zarówno pod względem rozrzutu, jak i wartości średnich.

Przebiegi zmian pokrycia względnego aproksymowano za pomocą funkcji złożonej z dwu członów wykładniczych o różnych stałych czasowych

$$pk(Ls) = Pk0 + Pk1 \cdot \left( 1 - e^{-\frac{-(Ls-Ls1)}{T1}} \right) + Pk2 \cdot \left( 1 - e^{-\frac{-(Ls-Ls2)}{T2}} \right).$$

Następnie wyzerowano tę część przebiegu, która przyjmuje wartości ujemne

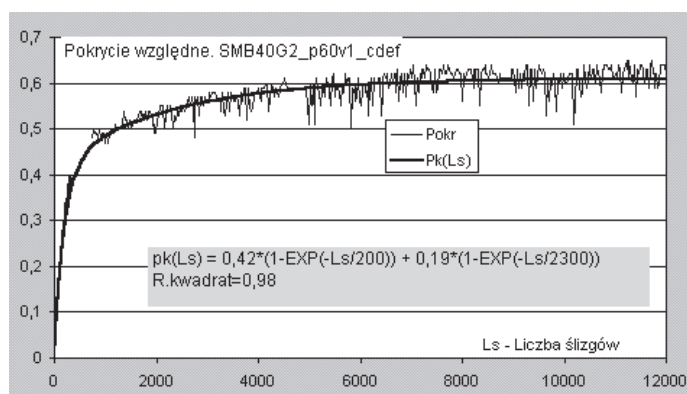
$$PK(Ls) = IF(pk(Ls) > 0, pk(Ls), 0).$$

Oto znaczenie poszczególnych oznaczeń w powyższych wzorach:

- $PK(Ls)$  – funkcja aproksymująca (0 = brak pokrycia, 1 = pełne pokrycie),
- $Ls$  – liczba ślizgów czyli obrotów tarczy,
- $Pk0$  – początkowy poziom pokrycia (dla czystej tarczy powinien wynosić zero),
- $Ls1$  – odcięta początku przebiegu pierwszego członu wykładniczego,
- $Pk1$  – poziom ustalony pierwszego członu wykładniczego,
- $T1$  – stała czasowa pierwszego członu wykładniczego,
- $Ls2$  – odcięta początku przebiegu drugiego członu wykładniczego,
- $Pk2$  – poziom ustalony drugiego członu wykładniczego,
- $T2$  – stała czasowa drugiego członu wykładniczego.

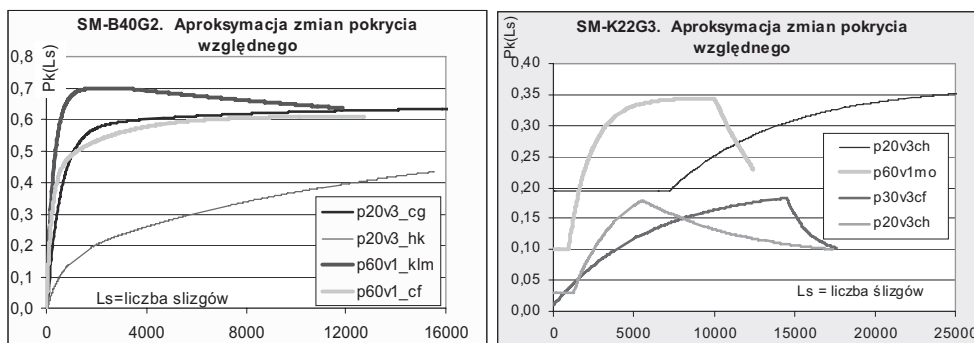
Funkcję aproksymującą przebiegi opracowano dla Excela w języku VBA.

Przykład aproksymacji przebiegu zmian pokrycia względnego dla materiału SM-B40G2 oraz parametrów tarcia:  $p = 60$  N,  $v = 1$  m/s pokazano na rysunku 12.



Rys. 12. SMB40G2\_p60v1\_cdef. Aproksymacja pokrycia względnego funkcją wykładniczą

Zaproponowana funkcja pozwala dobrze przybliżyć charakter większości uzyskiwanych w eksperymentach przebiegów zmian pokrycia powierzchni. Powtarzanie doświadczeń dostarcza krzywych o zbliżonym charakterze, jednak często o znacznie różniących się parametrach, co widać na rysunku 13.



Rys. 13. Krzywe aproksymujące zmiany pokrycia dla materiałów SMB40G2 i SMK22G3

## 8. Podsumowanie

Przeanalizowane sekwencje obrazów mimo słabej jakości i znacznego poziomu zakłóceń pozwalają odzwierciedlić charakter zmian powierzchni nanoszonych w trakcie tarcia na powierzchnię stali warstewek materiałów kompozytowych. Zastosowane metody przetwarzania wstępnego i segmentacji pozwoliły skompensować istotne błędy akwizycji i wyodrębnić obszar zmian powierzchni. Zaproponowana funkcja dobrze przybliżyła otrzymane przebiegi eksperymentalne (średnia wartość kwadratu współczynnika korelacji Pearsona  $R^2 > 0,9$ ) i pozwala zaobserwować różnice oraz cechy wspólne przebiegów.

Brak powtarzalności parametrów krzywych wynika najprawdopodobniej z trudności otrzymania tych samych warunków początkowych, a w szczególności stanu powierzchni tarczy stalowej przed eksperymentem. Problemy te wymagają dokładniejszej analizy w ramach badań tribologicznych. Konieczne jest również zarejestrowanie znacznie większej liczby sekwencji obrazów, zarówno przy powtarzaniu eksperymentów dla tych samych parametrów powierzchni i procesu tarcia jak i dla różnych wartości nacisku  $P$  oraz prędkości ślizgania  $v$ . Przy obecnej niewielkiej liczbie sekwencji obrazów, wyniki mają charakter orientacyjny, a wiarygodność ich nie może być weryfikowana statystycznie.

## Literatura

- [1] Franklin S.E., de Kraker A.: *Investigation of counterface surface topography effects on the wear and transfer behaviour of a POM–20% PTFE composite*. *Wear*, 255, 2003, 766–773
- [2] Oleksiak Z.: *Urządzenie do testowania tworzyw konstrukcyjnych na tarcie i zużywanie*. XVI Sympozjon PKM, Komunikaty, Warszawa, Politechnika Warszawska, 1993
- [3] Oleksiak Z., Rudnicki Z.: *Computer analysis of images of worn surfaces*. *Zagadnienia Eksploatacji Maszyn*, z. 3 (131), 2002, 73–84

- 
- [4] Rudnicki Z.: *Analiza sekwencji obrazów niejednorodnych*. Informatyka w Technologii Materiałów: kwartalnik AGH, nr 2, t. 3, 2003, 86–96
  - [5] Rudnicki Z.: *Analiza subtelnych zmian obrazów w warunkach błędów procesu akwizycji*. Mat. IV Krajowej Konferencji MSK'03 – Metody i Systemy Komputerowe, Kraków, 2003, 371–376
  - [6] Senatrev A.N., Smurugov V.A., Savkin V.G.: *K mechanizmu frikcyjnego pierenosa i samosmazhivaniya PTFE*. *Trenie i Iznos*. 1991, t. 12, nr 6, 773–778
  - [7] Stachowiak G.W., Batchelor A.W.: *Engineering Tribology*. Butterworth-Heinemann, USA, 2001
  - [8] Tadeusiewicz R., Korohoda P.: *Komputerowa analiza i przetwarzanie obrazów*. Wyd. Fundacji Postępu Telekomunikacji, Kraków, 1997
  - [9] Umeda A., Sugimura J., Yamamoto Y.: *Characterization of wear particles and their relations with sliding conditions*. *Wear* 216, 1998, 220–228