Małgorzata WRONA^{*}

CHARAKTERYSTYKA BARWY CZĄSTEK ZUŻYCIA Z ZASTOSOWANIEM CYFROWEJ ANALIZY OBRAZU

CHARACTERIZATION OF WEAR PARTICLES COLOUR USING DIGITAL IMAGE ANALYSIS

Słowa kluczowe:

cząstki zużycia, komputerowa analiza obrazu, barwa

Key-words:

wear particles, computer image analysis, colour

Streszczenie

W pracy przedstawiono metodę określania barwy cząstek zużycia przy zastosowaniu komputerowej analizy obrazu powierzchni cząstek, uzyskanego w mikroskopie świetlnym. Do badań wykorzystano jeden z wielu znanych modeli barw – CIE L*a*b*. Dla wydzielonych obszarów cząstek wyznaczano parametry statystyczne każdej ze składowych barw tego modelu. Otrzymane wyniki badań wskazują na możliwość wnioskowania o rodzaju cząstek zużycia na podstawie badań ich barwy.

^{*} Instytut Technologii Eksploatacji – PIB, ul. Pułaskiego 6/10, 26-600 Radom, tel. (048) 364-39-03.

WPROWADZENIE

Określenie barwy cząstek zużycia jest ważnym zadaniem związanym z rozpoznawaniem cząstek [L. 1, 3, 6]. Barwa jest bowiem jedną z podstawowych cech obserwowanych obiektów. Zależy ona zarówno od właściwości fizycznych danego obiektu (np. stopnia odbicia lub rozproszenia promieni świetlnych), jak i od warunków obserwacji (oświetlenia, widoczności). Analiza jakościowa barwy cząstek zużycia sprowadza się do wizualnej kontroli i porównania badanych cząstek. Natomiast analiza ilościowa może polegać na określeniu rozkładów i parametrów statystycznych składowych modelu barw [L. 3, 9].

W pracy **[L. 6]** zamieszczono wyniki badań dotyczących zastosowania modelu barw RGB do charakterystyki barwy cząstek zużycia. Poza modelem RGB do kodowania obrazów wykorzystywane są również inne modele barw, takie jak: CIE XYZ, CIE L*a*b*, CMYK, HSL, YUV itp. Celem niniejszej pracy było zbadanie możliwości wykorzystania modelu CIE L*a*b* do oceny barwy powierzchni cząstek zużycia. Ma to istotne znaczenie z punktu widzenia analizy cząstek dla wyjaśnienia mechanizmu zużycia.

MODEL BARW L*a*b*

Model barw CIE L*a*b* został opracowany w 1976 roku przez CIE (Międzynarodową Komisję Oświetleniową) [**L. 2, 8**]. W modelu tym barwa reprezentowana jest za pomocą składowej achromatycznej L* i dwóch składowych chromatycznych a* i b*. Jest on oparty na teorii barw przeciwstawnych, która zakłada, że kolor czerwony jest kolorem "przeciwnym" do koloru zielonego i analogicznie kolor niebieski jest "przeciwny" do koloru żółtego. CIE L*a*b* stanowi matematyczną transformację przestrzeni CIE XYZ:

$$L^* = 116 \cdot f\left(\frac{Y}{Y_o}\right) - 16,$$
$$a^* = 500 \cdot \left(f\left(\frac{X}{X_o}\right) - f\left(\frac{Y}{Y_o}\right)\right),$$
$$b^* = 200 \cdot \left(f\left(\frac{Y}{Y_o}\right) - f\left(\frac{Z}{Z_o}\right)\right),$$

gdzie: X, Y, Z – składowe trójchromatyczne barwy, X_o, Y_o, Z_o – składowe światła białego przyjętego za biel odniesienia.

Funkcja f(t) jest określona w następujący sposób:

$$f(t) = t^{\frac{1}{3}} \quad \text{dla } t > 0,008856,$$

$$f(t) = 7,787t + \frac{16}{116} \quad \text{dla } t \le 0,008856.$$

Zależności wiążące wartości L*, a*, b* ze składowymi X, Y, Z są zależnościami nieliniowymi i uwzględniają właściwości światła oświetlającego. Dla małych wartości zależności przechodzą w liniowe.

Transformację tę wprowadzono w wyniku badań nad spostrzeganiem przez oko ludzkie różnic między barwami. Różnica pomiędzy dwiema barwami w przestrzeni L*a*b* ma postać:

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^{*})^{2} + (\Delta a^{*})^{2} + (\Delta b^{*})^{2}}$$

i jest odległością euklidesową pomiędzy dwoma punktami w przestrzeni trójwymiarowej.

Model L*a*b*, mimo że nie stwarza zupełnie równomiernego rozłożenia barw w przestrzeni jest obecnie najpopularniejszym sposobem opisu barwy i stanowi podstawę współczesnych systemów zarządzania barwą. Jedną z jego zalet w porównaniu do modelu barwy RGB jest to, że jest niezależny od urządzeń zewnętrznych, jak np. kamera, monitor, drukarka. Umożliwia on definiowanie barw w taki sposób, aby mogły być one wykorzystywane przez wszystkie rodzaje urządzeń. Teoretycznie zawiera każdą barwę, jaką może rozpoznać oko ludzkie. Zakres barw, który obejmuje jest większy niż w modelu RGB lub CMYK (model barwy do określania farby dla drukarek).

METODYKA BADAŃ

Badaniami objęto cząstki zużycia otrzymane w testach tribologicznych w warunkach zapewniających wystąpienie zużywania: adhezyjnego, ściernego, scuffingowego i przy ślizganiu oscylacyjnym [L. 4–7]. Warunki te były modelowane przez dobór geometrii styku materiału i prędkości względnej współpracujących elementów, wielkości obciążeń mechanicznych oraz środka smarowego.

Obrazy mikroskopowe cząstek zużycia wykonano za pomocą systemu komputerowego przetwarzania i analizy obrazu firmy Computer Scanning Systems Ltd. (Polska). W systemie tym zastosowano:

- mikroskop MM-40 model L3FA firmy Nikon,
- cyfrową kamerę optyczną typu Industrial Color CCD Camera, model GP-KR222E firmy Panasonic,
- kartę Indeo fast Frame Grabber,
- komputer PC klasy Pentium z systemem operacyjnym Windows i programem MultiScan v. 8,08 do akwizycji, przetwarzania i analizy obrazu [L. 10].

Źródłem światła w mikroskopie świetlnym była żarówka halogenowa 12 V/50 W dająca temperaturę barwy ok. 3000°C. Obrazy rejestrowano przy oświetleniu światłem odbitym padającym prostopadle na powierzchnię sączka z odfiltrowanymi cząstkami zużycia, w celu uwidocznienia szczegółów ich powierzchni oraz barwy. Dla poprawy głębi ostrości obrazów rejestracji dokonywano z częściowo zamkniętą przysłoną. Dzięki możliwości regulowania ustawień przysłony uzyskano redukcję odblasków.

Do badań wybrano jeden ze znanych programów do przetwarzania graficznego obrazów bitmatowych Adobe Photoshop, w którym wykorzystywany jest model barw L*a*b*. Program ten oferuje możliwość wyświetlania histogramu rozkładu szarości w poszczególnych kanałach barwnych i globalnej szarości dla wydzielonego obszaru. Pozwala również na wykonywanie pomiarów na zapisanym cyfrowo obrazie, realizuje zatem niektóre zadania cyfrowej analizy obrazu. Okno histogramów prezentuje rozkłady barw składowych L, a, b, które nie są wartościami standardowymi. Przekształcenie danych jest możliwe według następujących wzorów:

$$L^* = \frac{L}{255} \times 100,$$
$$a^* = \frac{240a}{255} - 120,$$
$$b^* = \frac{240b}{255} - 120,$$

gdzie: *L*, *a*, *b* – składowe wyświetlone w oknie histogramu o wartościach od 0 do 255, L^* – składowa achromatyczna znormalizowana do zakresu

(0, 100), zawierająca informacje dotyczące luminancji obrazu, a^* – składowa chromatyczna znormalizowana do zakresu (-20, 120), zawierająca informacje o barwach od zielonej do czerwonej, b^* – składowa chromatyczna znormalizowana do zakresu (-120, 120), zawierająca informacje o barwach od niebieskiej do żółtej.

WYNIKI BADAŃ

Wyniki analizy barwy badanych cząstek zużycia w układzie CIE L*a*b* zestawiono w **Tabeli 1**. W **Tabeli 2** zamieszczono wartości nieznormalizowane Lab opisujące barwę cząstek. Dane dotyczą pomiarów 10 cząstek

| T | Della sectil | Description | τψ | . * | 1.* |
|-----|--------------------|-----------------|-------------|-------------|--------------|
| Lp. | Rodzaj cząstek | Parametry | L^{*} | a* | D* |
| | zużycia | statystyczne | | | |
| 1 | Cząstki zużycia | Min.÷Max. | 28,18÷49,78 | -3,95÷3,76 | -17,56÷-2,46 |
| | adhezyjnego – | Wartość średnia | 34,41 | 1,73 | -11,83 |
| | obciążenie 10 N | | | | |
| 2 | Cząstki zużycia | Min.÷Max. | 38,26÷75,62 | -2,55÷2,00 | -16,20÷2,42 |
| | adhezyjnego – | Wartość średnia | 57,13 | 0,05 | -4,4 |
| | obciążenie 30 N | | | | |
| 3 | Cząstki zużycia | Min.÷Max. | 31,02÷67,74 | -1,04÷1,84 | -15,98÷5,66 |
| | adhezyjnego – | Wartość średnia | 47,80 | 0,34 | -5,71 |
| | obciążenie 50 N | | | | |
| 4 | Cząstki zużycia | Min.÷Max. | 49,16÷78,98 | -1,06÷1,67 | -3,68÷15,12 |
| | scuffingowego - | Wartość średnia | 63,78 | 0,02 | 8,73 |
| | obciążenie 500 N | | | | |
| 5 | Cząstki zużycia | Min.÷Max. | 32,95÷65,65 | -3,43÷4,29 | -5,98÷22,83 |
| | scuffingowego – | Wartość średnia | 40,64 | -1,17 | 0,84 |
| | obciążenie 1000 N | | | | |
| 6 | Cząstki zużycia | Min.÷Max. | 33,19÷46,52 | -2,73÷-0,71 | -10,03÷-2,78 |
| | ściernego – obcią- | Wartość średnia | 40,59 | -1,46 | -6,12 |
| | żenie 30 N | | | | |
| 7 | Cząstki zużycia | Min.÷Max. | 46,01÷56,30 | 4,14÷9,36 | -15,40÷0,17 |
| | przy ślizganiu | Wartość średnia | 52,33 | 6,25 | -8,5 |
| | oscylacyjnym – | | | | |
| | obciążenie 50 N | | | | |
| 8 | Cząstki zużycia | Min.÷Max. | 48,76÷64,58 | 3,69÷14,25 | -16,08÷10,89 |
| | przy ślizganiu | Wartość średnia | 54,63 | 9,23 | -3,29 |
| | oscylacyjnym – | | | | |
| | obciążenie 100 N | | | | |

Tabela 1. Wartości średnie, minimalne i maksymalne L,*a,*b* cząstek zużycia Table 1. Mean, minimal and maximal values L*, a*, b* of wear particles

Skrajne wartości liczbowe uzyskano na podstawie pomiarów 10 cząstek.

| Lp. | Rodzaj czą- stek zużycia | Parametry staty- styczne | L | a | b |
|-----|--------------------------------|-----------------------------|---------------|---------------|---------------|
| 1 | Cząstki zuży- | Min.÷Max. | 71,86÷126,95 | 123,30÷131,50 | 108,84÷124,89 |
| | cia adhezyj- | Wartość średnia | 87,74 | 129,34 | 114,93 |
| | nego – obcią- | Mediana | 61÷126 | 123÷131 | 107÷125 |
| | żenie 10 N | Odchylenie standardowe | 12,31÷41,05 | 3,29÷11,14 | 5,41÷13,16 |
| 2 | Cząstki zuży- | Min.÷Max. | 97,56÷192,84 | 124,79÷129,62 | 110,29÷130,07 |
| | cia adhezyj- | Wartość średnia | 137,85 | 127,55 | 122,83 |
| | nego – obcią- | Mediana | 91÷180 | 125÷129 | 110÷129 |
| | żenie 30 N | Odchylenie standardowe | 17,99÷60,57 | 4,69÷11,90 | 4,85÷12,64 |
| 3 | Cząstki zuży- | Min.÷Max. | 79,10÷172,73 | 126,28÷129,45 | 110,52÷133,51 |
| | cia adhezyj- | Wartość średnia | 121,90 | 127,86 | 121,43 |
| | nego – obcią- | Mediana | 75÷177 | 126÷130 | 109÷133 |
| | żenie 50 N | Odchylenie standardowe | 20,67÷61,85 | 5,10÷13,95 | 8,44÷19,04 |
| 4 | Cząstki zuży- | Min.÷Max. | 125,37÷201,40 | 126,37÷129,27 | 123,59÷143,57 |
| | cia scuffin- | Wartość średnia | 162,63 | 127,52 | 136,78 |
| | gowego – | Mediana | 112-215 | 126÷129 | 121÷144 |
| | obciążenie | Odchylenie | 40,05÷67,96 | 5,18÷12,48 | 12,92÷19,15 |
| | 500 N | standardowe | | | |
| 5 | Cząstki zuży- | Min.÷Max. | 84,02÷167,42 | 123,86÷132,06 | 121,15÷151,76 |
| | cia scuffin- | Wartość średnia | 103,62 | 126,26 | 128,39 |
| | gowego – | Mediana | 78÷166 | 124÷130 | 122-151 |
| | obciążenie 1000 N | Odchylenie standardowe | 15,89÷54,82 | 3,84÷14,17 | 4,65÷18,66 |
| 6 | Cząstki zuży- | Min.÷Max. | 84,63÷118,20 | 124,60÷126,75 | 116,84÷124,55 |
| | cia ściernego | Wartość średnia | 103,50 | 125,95 | 121,00 |
| | obciążenie | Mediana | 80÷118 | 124÷127 | 116÷125 |
| | 30 N | Odchylenie standardowe | 16,75÷26,63 | 3,91÷8,80 | 5,22÷10,52 |
| 7 | Cząstki zużycia | Min.÷Max. | 117,32÷143,56 | 131,90÷137,45 | 111,14÷127,68 |
| | przy ślizganiu | Wartość średnia | 133,45 | 134,14 | 118,47 |
| | oscylacyjnym- | Mediana | 115÷144 | 132÷138 | 109÷128 |
| | obciążenie 50 N | Odchylenie standardowe | 11,45÷21,19 | 3,38÷5,65 | 6,21÷14,52 |
| 8 | Czastki zuży- | MinMax | 124.34-164.67 | 131.42-142.64 | 110.42-139.07 |
| Ŭ | cia przv śli- | Wartość średnia | 139.30 | 137.30 | 124.01 |
| | zganiu oscyla- | Mediana | 122÷153 | 134÷144 | 108÷141 |
| | cyjnym – | Odchvlenie | 10.11÷23.57 | 3.37÷6.16 | 6.84-14.42 |
| | obciążenie 100 N | standardowe | -,, | - , | -,, |

| Tabela 2. | Wartości liczbowe składowych barwy L, a, b cząstek zużycia |
|-----------|---|
| Table 2. | Numerical values of colour components L, a, b of wear particles |

Skrajne wartości liczbowe uzyskano na podstawie pomiarów 10 cząstek.

każdego rodzaju. Analiza barwy cząstek zużycia wykazała różnice jasności poszczególnych rodzajów cząstek. W analizowanych obrazach można zidentyfikować błyszczące cząstki metaliczne, charakteryzujące się najwyższymi wartościami poziomu jasności i ciemne cząstki metaliczne, pokryte różnego rodzaju tlenkami (np. Fe₂O₃, FeO). Każda z tych cząstek jest reprezentowana na histogramie (**Rys. 1 i 2**) przez pasma znajdujące się w pewnym charakterystycznym obszarze zmian jasności, co pozwala je klasyfikować. Najniższe jasności stwierdzono dla cząstek zużycia: adhezyjnego przy obciążeniu 10 N, ściernego i scuffingowego przy obciążeniu 1000 N (L* = 34,41, 40,59 i 40,64 odpowiednio), a najwyższe – dla cząstek zużycia: scuffingowego przy obciążeniu 500 N i adhezyjnego przy obciążeniu 30 N (L* = 63,78 i 57,13 odpowiednio).



- Rys. 1. Obraz cząstki zużycia scuffingowego przy obciążeniu styku 500 N (a) oraz histogramy jasności (b) i składowych: a (c) i b (d)
- Fig. 1. Image of the scuffing wear particle under frictional joint load 500 N (a) and histograms of grey levels (b) and components: a(c) i b(d)



Rys. 2. Obraz cząstki zużycia przy ślizganiu oscylacyjnym przy obciążeniu styku 100 N (a) oraz histogramy jasności (b) i składowych: a (c) i b (d)

Std Dev: 8,71

Median: 114

Pixels: 1471

Count: 0

Percentile: 100.00

Fig. 2. Image of the wear particle under oscillatory sliding conditions under frictional joint load 100 N (a) and histograms of grey levels (b) and components: a(c) i b(d)

Z porównania uzyskanych wartości wynika, że różnice jasności pomiędzy poszczególnymi rodzajami cząstek kształtują się podobnie do różnic wyznaczonych w układzie RGB [L. 5]. Dobrym wskaźnikiem różnic pomiędzy badanymi rodzajami cząstek zużycia są także wartości a*. W przypadku cząstek zużycia: scuffingowego przy obciążeniu 1000 N i ściernego wartość średnia składowej a* była ujemna wskazując obecność barwy zielonej. We wszystkich pozostałych przypadkach stwierdzono wartość dodatnią składowej a*, co z kolei wskazuje na obecność barwy czerwonej. Dla cząstek zużycia przy ślizganiu oscylacyjnym wartości liczbowe tego parametru wynosiły odpowiednio 9,23 przy obciążeniu 100 N i 6,25 przy obciążeniu 50 N, co dowodzi relatywnie wysokiego udziału tej barwy. Z zakresu zmian wartości a* wynika, że składowa zielona była także obecna w innych rodzajach cząstek. Składowa b* wykazywała ujemne wartości dla cząstek zużycia: adhezyjnego, ściernego i przy śliz-

Std Dev: 4,07

Median: 135

Pixels: 1471

Count

Percentile

148

ganiu oscylacyjnym, przy czym najwyższym stopniem nasycenia barwy niebieskej charakteryzowały się cząstki zużycia adhezyjnego przy obciążeniu 10 N (b* = -11,83). Natomiast najwyższe nasycenie barwy żółtej stwierdzono dla cząstek zużycia scuffingowego przy obciążeniu 500 N $(b^* = 8,73)$. Analiza barwy przeprowadzona z zastosowaniem modelu L*a*b* wskazuje na podobne tendencje jak w przypadku stosowania modelu RGB, tj. obserwuje się wpływ typu cząstek na parametry barwy. Z powyższych rezultatów wynika, że metoda ta pozwala rozróżnić cząstki zużycia scuffingowego przy obciążeniu 500 N i w warunkach ślizgania oscylacyjnego od pozostałych badanych cząstek. Jednak, aby dawała ona wyniki na poziomie użytecznym dla przemysłu w kontroli stanu węzłów kinematycznych, konieczne są dalsze prace. Ocenie mogą być również poddawane inne parametry statystyczne opisujące barwę, takie jak: odchylenie standardowe, skośność, kurtoza. Przy dokonywaniu wyboru najbardziej efektywnych parametrów możliwe jest zastosowanie zaawansowanych metod analizy danych, np. metody PCA.

PODSUMOWANIE

Uzyskane wyniki wskazują na przydatność modelu L*a*b* w badaniach, których celem jest identyfikacja barwy cząstek zużycia. Poprzez wprowadzenie oceny ilościowej oraz wyeliminowanie czynników subiektywnych w trakcie badania opisana metoda pomiarów powinna prowadzić do trafniejszej i dokładniejszej identyfikacji rodzajów cząstek. Zarówno model RGB, jak i model L*a*b* mogą być stosowane do charakterystyki cząstek zużycia. Jednakże model L*a*b* z czterema barwami podstawowymi stwarza większe możliwości tej charakterystyki. Połączenie informacji o kształcie i teksturze cząstek zużycia z informacją o barwie cząstek pozwoli na bardziej kompleksową ich ocenę. Taki sposób podejścia do analizy cząstek umożliwia szczególnie szybki rozwój metod komputerowych.

Praca naukowa finansowana ze środków budżetowych na naukę w latach 2006–2008 jako projekt badawczy.

LITERATURA

1. Hunt T.M.: Handbook of wear debris analysis and particle detection in liquids. Elsevier Science Publishers LTD, 1993.

- 2. McClelland D.: Photoshop 6/6 CE. Wyd. Helion, Gliwice 2001.
- 3. Myshkin N.K., Kong H., Grigoriev A.Ya., Yoon E.-S.: The use of color in wear debris analysis. Wear 2001, 251, s. 1218–1226.
- 4. Szczerek M., Wiśniewski M. (red.): Tribologia i tribotechnika. Wyd. ITeE, Radom 2000.
- 5. Wrona M.: Pomiary parametrów geometrycznych cząstek zużycia z zastosowaniem komputerowej analizy obrazu. Kongres Metrologii "Metrologia w procesie poznania", Wrocław 2004. s. 253–256.
- 6. Wrona M.: Ocena możliwości zastosowania komputerowej analizy barwy do identyfikacji cząstek zużycia tribologicznego. Tribologia 2005, 3, s. 351–361.
- 7. Wrona M.: Ilościowa analiza tekstury cząstek zużycia z wykorzystaniem komputerowej analizy obrazu. Tribologia 2006, 4, s. 181–190.
- 8. Zabrodzki J. (red.): Grafika komputerowa; metody i narzędzia. WNT, Warszawa 1994.
- 9. Zieliński K.W., Strzelecki M.: Komputerowa analiza obrazu biomedycznego. Wstęp do morfomertrii i patologii ilościowej. PWN, Warszawa 2001.
- 10. Instrukcja obsługi systemu pomiarowego MultiScanBase v. 8.08.

Recenzent: Zbigniew RUDNICKI

Summary

In this work method for the determination of the wear particles colour using computer image analysis of wear surface obtained in light microscope was presented. In the research one of the many colour models – CIE L*a*b* was applied. For selected region of particles statistical parameters of each colour component of this model were calculated. The obtained research results show that is possible to conclude about wear particles type on the basis of their colour research.