

Jarosław Molenda, Tomasz Wójcicki, Ewa Pawelec
Instytut Technologii Eksploatacji – PIB, Radom

Zastosowanie komputerowej analizy obrazu do ilościowego opisu oddziaływań adhezyjnych smaru plastycznego z powierzchnią stali

Wprowadzenie

Współczesne wymagania eksploatacyjne stawiane urządzeniom technicznym (temperatura pracy, oddziaływanie promieniowania jonizującego, obciążenia węzłów tarcia, a także oddziaływania wody oraz agresywnych czynników chemicznych) wpływają na rozwój nowej generacji środków smarowych. Jedną z grup płynów eksploatacyjnych podlegających dynamicznemu rozszerzaniu asortymentu są smary plastyczne, które opracowuje się do wielu (często niekonwencjonalnych) aplikacji. Znajdują one zastosowanie w urządzeniach przemysłu maszynowego, motoryzacyjnego, lotniczego, spożywczego, farmaceutycznego oraz w wielu innych gałęziach gospodarki. Szerokie spektrum aplikacji współczesnych smarów powoduje, iż muszą się one charakteryzować wieloma – często specyficznymi – właściwościami fizykochemicznymi, do których należy m.in. podwyższona adhezja do współpracujących elementów węzła tarcia [1, 4, 8, 9, 10]. Podwyższona adhezja smaru jest szczególnie ważna w przypadku jego eksploatacji w warunkach wysokich temperatur oraz dużych prędkości obrotowych łożyska. Efekt adhezji jest ściśle powiązany z kohezją smaru, czyli jego spoistością wewnętrzną. Interakcje te uzależnione są od oddziaływań międzycząsteczkowych, za które odpowiadają siły Van der Waalsa. Właściwości eksploatacyjne smarów plastycznych są kształtowane poprzez odpowiedni dobór

komponentów, tj. bazy olejowej i substancji zagęszczających, a także dodatków uszlachetniających, wśród których można wymienić: antyutleniacze, dodatki smarnościowe oraz dodatki podwyższające adhezję smaru do elementów węzła tarcia [5, 6, 11].

W związku z powyższym, na etapie kontroli jakości nowo wytwarzanych smarów niezbędne jest stosowanie obiektywnych metod testowych, pozwalających na laboratoryjne zbadanie właściwości eksploatacyjnych wytwarzanych produktów. Dotychczas do oceny adhezji smarów stosowana była metoda porównawcza, opisana normą PN-69/C-04153 *Badanie skłonności do spływania smarów plastycznych z powierzchni metalu*, polegająca na pomiarze czasu spływu naniesionej warstwy smaru na ułożone pionowo metalowe podłoża, wykonane ze stali, miedzi i aluminium. Metoda ta nie była jednak przydatna do oceny smarów plastycznych nowej generacji i została wycofana z polskiego systemu normalizacyjnego, co spowodowało ewidentny brak efektywnej metody badawczej pozwalającej na ocenę porównawczą smarów, w aspekcie ich adhezji do podłoży wykonanych z metali.

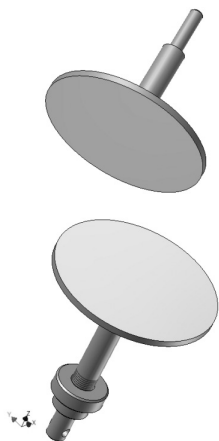
Celem pracy było opracowanie metody badawczej pozwalającej na ilościowy opis oddziaływań adhezyjnych pomiędzy smarem, a roboczymi powierzchniami elementów wykonanych ze stali.

Metodyka badań

Podczas badań wykorzystywano tarcze testowe o średnicy 10 cm, wykonane ze stali nierdzewnej, pomiędzy

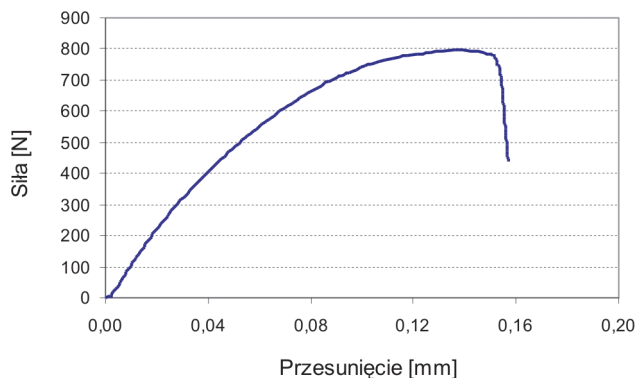
które naniesiono smar plastyczny, a następnie poddawano je rozciąganiu na maszynie wytrzymałościowej Instron.

Zastosowane tarcze przedstawiono na fotografii 1. Robocze powierzchnie tarcz testowych były szlifowane – do uzyskania chropowatości nie większej niż $0,63 \mu\text{m}$. Podczas każdego pomiaru stosowano jednakową grubość warstwy smaru, wynoszącą $0,2 \text{ mm}$ – co uzyskano przez wstępne dociśnięcie tarcz testowych w taki sposób, aby uzyskać założoną szczelinę. Pozostałość wyciśniętego smaru usuwano mechanicznie. Następnie tarcze rozsuwano z prędkością $0,033 \text{ mm/s}$.



Fot. 1. Wygląd tarcz testowych zastosowanych podczas rozciągania warstwy naniesionego smaru

Rozsuwanie tarcz prowadzono do momentu rozerwania warstwy smaru, co obserwowano jako gwałtowne zmniejszenie się wartości siły mierzonej podczas rozciągania. Typowy przebieg zmian wartości tej siły przedstawiono na rysunku 1.



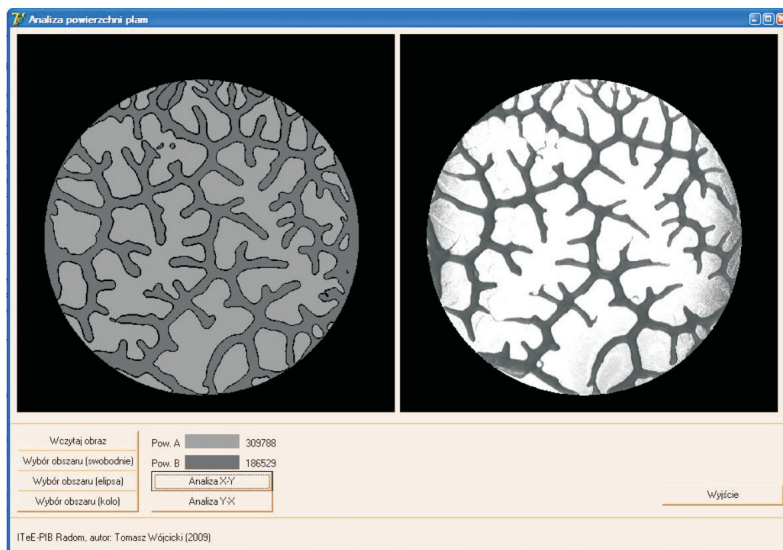
Rys. 1. Przykładowy przebieg krzywej rozrywania warstwy smaru

Po rozerwaniu naniesionej warstwy smaru powierzchnię dolnej tarczy fotografowano, a uzyskane zdjęcia poddawano komputerowej analizie obrazu, według opracowanego algorytmu. Testy przeprowadzono dla czterech próbek tego samego smaru plastycznego, zawierającego różne ilości dodatku adhezyjnego Vanlube TK-100, firmy R.T. Vanderbilt Company, będącego ciekłym kopolimerem etylenowo-propylenowym. Zbadano próbkę bez dodatku oraz z zawartością 2,5; 5 i 10% (m/m) dodatku (oznaczonego symbolem VAN). Ponadto do celów porównawczych zbadano próbkę komercyjnego smaru o symbolu GLS 367/N2, rekomendowanego jako produkt o podwyższonej adhezji do podłoży stalowych. Wynik dla każdej zbadanej próbki podawano jako średnią arytmetyczną z trzech pomiarów. Wszystkie próbki smaru posiadały 2 klasę konsystencji, co gwarantowało porównywalną wielkość oddziaływań kohezyjnych, odpowiedzialnych za spoiwość smaru.

Algorytm oraz oprogramowanie do komputerowej analizy obrazu

Na potrzeby badań zaprojektowano i wykonano program komputerowy APP (Analizator Powierzchni Plam), przeznaczony do analizy obrazów cyfrowych. Oprogramowanie to wykonane zostało w formie aplikacji dla systemów operacyjnych z rodziny MS Windows. W celu ułatwienia obsługi aplikacji przez użytkownika opracowano okienkowy interfejs, umożliwiający wykonywanie czynności związanych z wykorzystaniem programu (fotografia 2).

Od strony interakcji z użytkownikiem, proces analizy bazuje na wyborze obszaru do badań i inicjowany jest przez naciśnięcie przycisku rozpoczynającego analizę. Aplikacja akceptuje zdjęcia próbek w różnych rozdzielczościach, co



Fot. 2. Wygląd interfejsu użytkownika programu APP

daje możliwość wykonywania ich przy pomocy aparatury różnego typu. Ponieważ próbki poddawane analizie mogą mieć odmienne kształty, w aplikacji zaimplementowano możliwość wyznaczenia obszaru analizy – ROI (ang. *Region Of Interest*) [2], poprzez wybranie regionu w kształcie koła, elipsy lub swobodnego zaznaczenia. Jako wynik końcowy oprogramowanie zwraca liczbę pikseli reprezentujących powierzchnię próbki pokrytą smarem oraz liczbę pikseli reprezentujących powierzchnię próbki wolną od smaru.

Proces analizy obrazu przebiega według następującego schematu:

- obraz cyfrowy przedstawiający próbkę do analizy ładowany jest do pamięci komputera (w przypadku zdjęcia kolorowego jest on konwertowany na skalę szarości o 256 poziomach),
- zapamiętywany jest obszar reprezentujący ROI,
- dokonywana jest filtracja z wykorzystaniem filtru krawędziowego typu DoG (*Difference of Gaussians*) [7], celem uwypuklenia krawędzi rozdzielających obszar pokryty smarem oraz wolny od niego.

Działanie filtra bazuje na wyznaczeniu różnicy dwóch funkcji Gaussa, zgodnie z równaniem:

$$DoG = G_1 \cdot f(x,y) - G_2 \cdot f(x,y)$$

gdzie $f(x,y)$ jest wartością jasności piksela o współrzędnych x, y , zaś składowe funkcje Gaussa reprezentowane są następująco:

$$G_1 = \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma_1^2}} \quad G_2 = \frac{1}{\sigma_2 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma_2^2}}$$

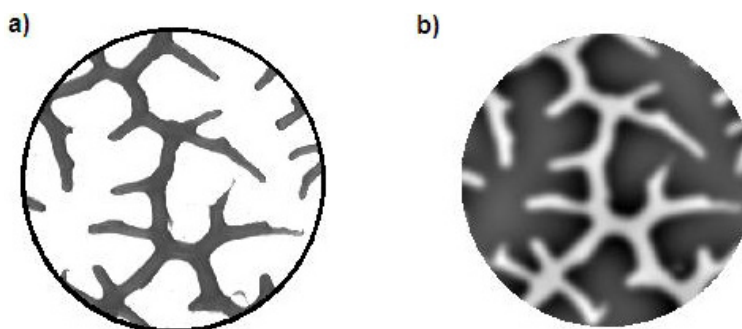
σ_1 oraz σ_2 są składowymi funkcji Gaussa i wyznacza się je z równań:

$$\sigma_1 = \frac{\sigma}{\sqrt{-2 \frac{\log\left(\frac{1}{\alpha}\right)}{\alpha^2 - 1}}} \quad \sigma_2 = \frac{\sigma_1}{\alpha}$$

gdzie σ oraz α to współczynniki formujące funkcje Gaussa. Ich wartości dobierane są zależnie od aparatury, na której rejestrowane są zdjęcia – co związane jest z warunkami oświetlenia próbek.

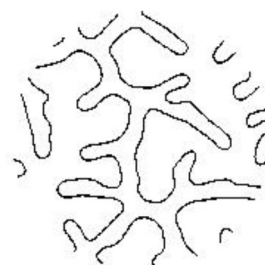
W przypadku aparatury wykorzystywanej w badaniach, wartości tych współczynników wynosiły odpowiednio 10 i 5. Obraz przed i po filtracji przedstawiono na fotografii 3.

Przefiltrowany obraz poddawany jest operacji typu *zero-crossing* [3], w celu wyznaczenia regionu reprezentującego



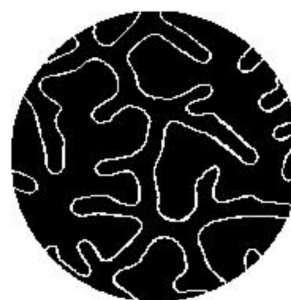
Fot. 3. Obszar ROI poddany filtracji typu DoG:
a) przed filtracją, b) po filtracji

krawędzie. Wynikiem tej operacji są linie rozdzielające obszary pokryte smarem od obszarów wolnych od niego (fotografia 4).



Fot. 4. Wynik działania operacji *zero-crossing*

Region reprezentujący krawędzie poddawany jest operacji morfologicznej (jaką jest dylatacja [3]), z kołowym elementem strukturyzującym o rozmiarze 1,5 – w celu zachowania ciągłości krawędzi wyznaczonych w poprzedniej operacji oraz poprawy separacji obszarów smaru od wolnych od niego. Wyznaczana jest różnica pomiędzy ROI, a regionem reprezentującym krawędzie (fotografia 5), w celu dokonania podziału regionu na odseparowane obszary smaru i czystej powierzchni. Po tej operacji otrzymywana jest tablica mniejszych regionów, reprezentujących poszczególne obszary.



Fot. 5. Przykładowy obraz po operacji dylatacji oraz po obliczeniu różnicy pomiędzy ROI a regionem reprezentującym krawędzie

Kolejnym etapem jest etykietowanie (fotografia 6) graniczących ze sobą obszarów z tablicy regionów, na przemienne: jako regiony reprezentujące obszary pokryte smarem oraz obszary wolne od smaru.

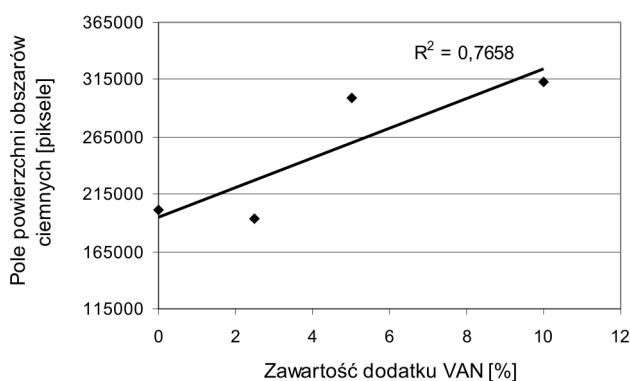
Końcowym etapem procedury obliczeniowej stosowanej w algorytmie komputerowej analizy obrazu jest obliczenie liczby pikseli w każdym z regionów i ich zsumowanie dla obszarów reprezentujących smar oraz wolnych od niego.



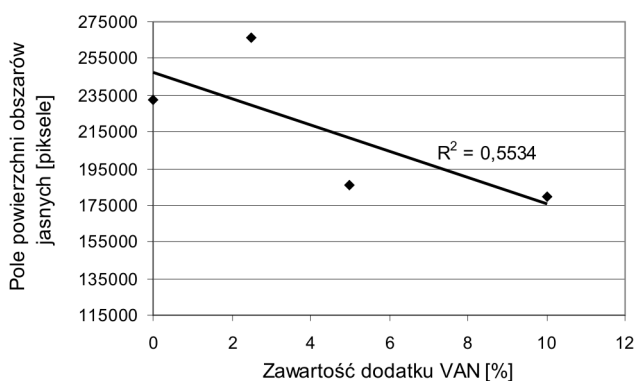
Fot. 6. Przykładowy obraz tarczy testowej, z zaetykietowanymi regionami, reprezentującymi smar (obszary ciemne) oraz powierzchnie bez smaru (obszary jasne)

Weryfikacja przydatności opracowanej metody oceny adhezji smaru do podłoża

Przydatność opracowanego algorytmu oceny oddziaływań międzyfazowych smar-powierzchnia stali została oceniona na podstawie badań przygotowanych próbek testowych smaru, o wzrastającej zawartości komercyjnego dodatku adhezyjnego. Wyniki pomiarów wielkości obszarów testowych tarcz, wykonanych ze stali, które po rozciąganiu na maszynie wytrzymałościowej są pokryte smarem (pola ciemne) lub nie są nim pokryte (pola jaśniejsze), zestawiono na rysunkach 2 i 3.



Rys. 2. Zależność pola powierzchni obszarów tarczy testowej pokrytej smarem (po teście rozciągania), od zawartości dodatku adhezyjnego

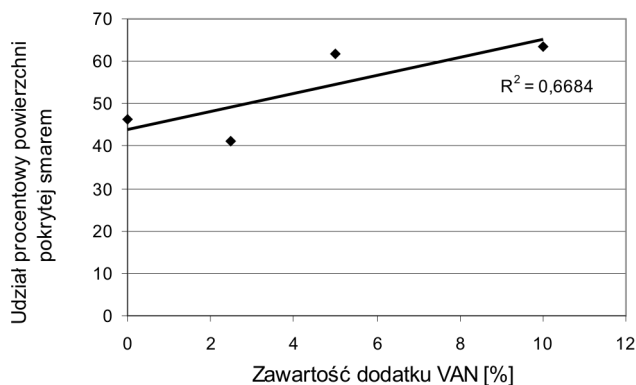


Rys. 3. Zależność pola powierzchni obszarów tarczy testowej wolnej od smaru (po teście rozciągania), od zawartości dodatku adhezyjnego

Analiza zależności pomiędzy liczbą pikseli, określających poszczególne obszary, a zawartością dodatku adhezyjnego, wskazuje jednoznacznie, iż wraz ze wzrostem stężenia substancji poprawiającej adhezję wzrasta pole obszaru pokrytego smarem (rysunek 2). Jednocześnie stwierdzono liniową korelację pomiędzy tymi parametrami, charakteryzującą się współczynnikiem dopasowania liniowego R^2 wynoszącym 0,7658. W związku z powyższym, sumaryczna wielkość obszaru pokrytego smarem – wyrażona w pikselach – może stanowić parametr określający stopień adhezji badanego produktu do materiału konstrukcyjnego tarczy testowej. Gorszym (od przedstawionego na rysunku 2) dopasowaniem liniowym charakteryzuje się zależność obszaru (wyrażonego w pikselach) niepokrytego smarem, od zawartości dodatku adhezyjnego (rysunek 3). Niemniej jednak obserwuje się malejący trend liniowy, wynikający z oddziaływań kohezyjnych. Oczywistym jest fakt, iż wzrost adhezji – przy stałej sile rozciągającej przyłożonej do tarcz testowych – powodować będzie widoczny efekt osłabienia sił spistości. Jednak wartość współczynnika korelacji liniowej R^2 wynosząca 0,5534 wskazuje, iż nie jest to dobry parametr oceny oddziaływań kohezyjnych smaru.

Do celów jakościowej analizy porównawczej różnych smarów możliwe jest wykorzystanie ułamkowej wartości powierzchni tarczy testowej pokrytej smarem po teście rozciągania, którą wyraża się w procentach, jako iloraz pola powierzchni tarczy testowej pokrytej smarem (ilość pikseli pól ciemnych na obrazach) i sumy pól powierzchni pokrytych (ilość pikseli obszarów ciemnych na obrazach zamieszczonych na fotografii 6) oraz niepokrytych smarem (ilość pikseli obszarów jasnych na obrazach zamieszczonych na fotografii 6). Wartości takie dla badanych próbek smaru zestawiono na rysunku 4.

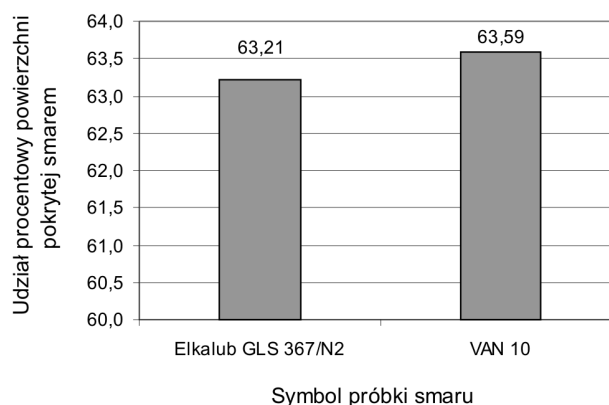
Przedstawiona na rysunku 4 zależność wskazuje, iż możliwe jest wykorzystanie tego wskaźnika – określanego jako udział procentowy pola powierzchni tarczy, na której pozostał smar po rozciąganiu naniesionej warstwy – do oceny porównawczej smarów, w aspekcie ilościowego



Rys. 4. Zależność udziału procentowego obszaru tarczy testowej pokrytej smarem (po procesie rozciągania), od zawartości dodatku adhezyjnego

opisu oddziaływań adhezyjnych z podłożem stalowym. Wykonano również badania porównawcze smaru komercyjnego o symbolu GLS 367/N2, rekomendowanego jako produkt o podwyższonej adhezji do podłoża stalowych. Na rysunku 5 przedstawiono wartości proponowanego parametru, opisującego oddziaływanie adhezyjne, stanowiącego udział procentowy pola obszarów tarczy testowej pokrytej smarem po procesie rozrywania na maszynie wytrzymałościowej, odniesiony do całkowitej powierzchni tarczy.

Na podstawie porównania wyników komputerowej



Rys. 5. Porównanie smaru komercyjnego oraz kompozycji testowej zawierającej 10% (m/m) dodatku adhezyjnego

analizy obrazu (rysunek 5) próbki smaru komercyjnego Elkalub GLS 367/N2 oraz próbki testowej VAN 10 (tj. najlepszej kompozycji spośród sporządzonych do celów badawczych) można przyjąć, iż przekroczenie 60-procentowego progu pokrycia powierzchni tarczy testowej smarem po procesie rozciągania może stanowić kryterium kwalifikowania produktu do kategorii preparatów o podwyższonej adhezji do podłoża stalowego. Niemniej jednak hipoteza ta wymaga zrealizowania dalszych badań weryfikacyjnych, dla różnych produktów z określonej klasy konsystencji.

Podsumowanie

Zrealizowane badania pozwoliły na opracowanie metody testowania smarów plastycznych, w aspekcie ilościowego opisu oddziaływań adhezyjnych smaru z podłożem wykonanym ze stali. Metoda badawcza polega na rozciąganiu warstwy smaru – znajdującej się między tarczami testowymi – aż do jej rozerwania, a następnie fotografowaniu powierzchni tarczy oraz komputerowej analizie obrazu, pozwalającej na obliczenie udziału procentowego pola powierzchni tarczy pokrytego pozostałością smaru. Wstępne prace laboratoryjne opracowanego algorytmu komputerowej analizy obrazu, przeznaczonego do oceny

adhezji smarów, wskazują, iż może on stanowić dogodne narzędzie analityczne, przydatne do obiektywnej kontroli właściwości eksploatacyjnych smarów plastycznych. Warunkiem porównywalności uzyskiwanych wyników jest odpowiednie przygotowanie elementów testowych do rejestracji obrazów cyfrowych, co związane jest z koniecznością badania smarów należących do tej samej klasy konsystencji, a także każdorazowe naniesienie na tarcze testowe warstwy smaru o identycznej grubości. Ponadto niezbędne jest zastosowanie urządzenia umożliwiającego rozsuwanie tarcz ze stałą prędkością.

Artykuł nadesłano do Redakcji 31.01.2011 r. Przyjęto do druku 13.04.2011 r.

Recenzent: prof. dr Michał Krasodomski

Literatura

- [1] Bajer J., Janecki J.: *Syntetyczne smary plastyczne do różnych zastosowań*. Problemy Eksploatacji, 2004, 4, 199–206, 2004.
- [2] Batchelor B. Waltz F.: *Intelligent machine vision*. Springer-Verlag, London, 2001.
- [3] Bovik A.: *Handbook of Image & Video Processing*. Elsevier Inc., US, 2005.
- [4] Drabik J., Pawelec E., Janecki J.: *Environmentally-friendly ecological greases*. Tribologia, 2004, 6, 53–60, 2004.
- [5] Jiguo Chen: *Tribological properties of polytetrafluoroethylene, nano-titanium dioxide and nano-silicon dioxide, as additives in mixed oil-based titanium complex grease*. Tribol. Lett., 2010, 38: 217–224, 2010.
- [6] Kozdrach R., Drabik J., Pawelec E., Molenda J.: *Wpływ*

dodatku modyfikującego AR na właściwości tribologiczne ekologicznych smarów plastycznych. *Tribologia*, 2010, 1, 27–39, 2010.

- [7] Lowe D.: *Distinctive image features from scale invariant features*. *International Journal of Computer Vision*, 60, 2, 2004.
- [8] Menchen P.: *Środki smarowe w maszynach przemysłu spożywczego*. *Inżynieria i Aparatura Przemysłu Spożywczego*, 89–90, 1, 2007.
- [9] Woźniczko-Kadela W., Pindel D., Tałach Z.A.: *Smar do armatury instalacji urządzeń i aparatów gazowych*. *Nafta-Gaz*, 59, 2, 80–88, 2003.
- [10] Zajezińska A., Kowalski P.: *Wielofunkcyjne smary polimocznikowe*. *Nafta-Gaz*, 57, 3, 160–169, 2001.



Mgr inż. Tomasz WÓJCICKI – pracownik Zespołu Technologii Informatycznych w Instytucie Technologii Eksploatacji – PIB w Radomiu. Zainteresowania zawodowe: programowanie i robotyka. Autor rozwiązań informatycznych z zakresu analizy obrazów, sztucznej inteligencji, modelowania 3D oraz sterowania procesami produkcji. Wyniki wielu z tych prac opublikował w specjalistycznych periodykach.

- [11] Zheleznyi L.V., Bogaichuk A.V., Kobylanskii E.V., Mishchuk O.A.: *Antiwear properties of high-temperature greases*. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, 43, 6, 488–494, 2007.



Dr inż. Jarosław MOLENDĄ – absolwent Wyższej Szkoły Inżynierskiej w Radomiu (obecnie Politechnika Radomska). Stopień doktora nauk chemicznych uzyskał na Wydziale Fizyki i Chemii Uniwersytetu Łódzkiego. Adiunkt w Instytucie Technologii Eksploatacji PIB w Radomiu, kieruje pracami Zakładu Technologii Proekologicznych. Specjalność – chemia organiczna oraz technologia chemiczna.



Dr inż. Ewa PAWELEC – absolwentka Politechniki Radomskiej. Tytuł doktora nauk technicznych uzyskała w Wojskowym Instytucie Techniki Panczernej i Samochodowej. Adiunkt w Zakładzie Technologii Proekologicznych Instytutu Technologii Eksploatacji – PIB w Radomiu. Zajmuje się opracowywaniem technologii otrzymywania ekologicznych, biodegradowalnych środków smarowych.