

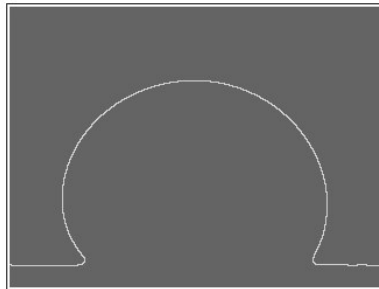
Tomasz Koszmider*, Marcin Bąkała*

Nowe algorytmy analizy kształtu kropli w pomiarach napięcia powierzchniowego oraz kąta zwilżania metali w wysokich temperaturach

1. Wprowadzenie

Algorytmy analizy kształtu kropli przedstawione w niniejszym artykule zostały opracowane na potrzeby projektu badawczo-rozwojowego Thermo-Wet, prowadzonego w Katedrze Informatyki Stosowanej Politechniki Łódzkiej. Projekt ten dotyczy zintegrowanego systemu komputerowego umożliwiającego pomiar parametrów fizykochemicznych (napięcie powierzchniowe, kąt zwilżania) [1] próbek metali i ich stopów znajdujących się w wysokich temperaturach. Pomiaru te przeprowadzane są na podstawie wyznaczonych cech geometrycznych badanych próbek wyznaczonych w procesie przetwarzania i analizy ich obrazów. Celem opracowania nowych algorytmów analizy kształtu kropli jest zwiększenie dokładności pomiarów napięcia powierzchniowego oraz kąta zwilżania badanych materiałów.

Danymi wejściowymi do etapu analizy kształtu kropli jest zbiór punktów tworzących krawędź zarysu próbki wraz ze stolikiem, na którym próbka ta spoczywa (rys. 1).



Rys. 1. Zbiór danych wejściowych dla procesu analizy kształtu

Punkty tworzące ten zbiór powinny tworzyć ciągłą krzywą o szerokości jednego piksela, składającą się z punktów posiadających maksymalnie dwóch b-sąsiadów, oraz rozpoczynającą się w pierwszej, a kończącą w ostatniej kolumnie obrazu.

* Katedra Informatyki Stosowanej, Politechnika Łódzka

2. Etapy procesu pomiarowego

Metoda pomiaru parametrów fizykochemicznych wykorzystywana na stanowisku badawczym Thermo-Wet opiera się na przetwarzaniu i analizie obrazów badanej próbki w celu wyznaczenia parametrów geometrycznych kropli umożliwiających obliczenie napięcia powierzchniowego oraz kąta zwilżania.

Pierwszym etapem procesu pomiarowego jest segmentacja obrazu, mająca na celu oddzielenie obszarów tła od obszarów reprezentujących badany obiekt. Wynikiem tego etapu jest binarna reprezentacja krawędzi stolika i znajdującej się na nim próbki, która stanowi jednocześnie dane wejściowe do etapu analizy kształtu kropli.

Proces analizy kształtu kropli wykorzystuje wiele algorytmów, realizujących cztery podstawowe zadania, które pozwalają wyznaczyć parametry geometryczne kropli niezbędne do obliczenia napięcia powierzchniowego oraz kąta zwilżania. Te zadania to:

- 1) wyznaczenie górnej krawędzi stolika – wyodrębnienie zbioru punktów krawędziowych reprezentujących krawędź kropli;
- 2) wyznaczenie punktów styczności trzech faz – eliminacja zniekształceń wprowadzonych przez zjawiska aury i odbicia;
- 3) aproksymacja brzegu kropli wielomianami stopnia n – wyznaczenie stycznych do półprofilu kropli w punktach styczności z górną krawędzią stolika oraz kątów ich nachylenia, które określają wartość kąta zwilżania badanej próbki;
- 4) wyznaczenie parametrów geometrycznych kropli niezbędnych przy obliczaniu napięcia powierzchniowego badanej próbki – maksymalna szerokość kropli i jej wysokość nad płaszczyzną równikową.

W niniejszym artykule przedstawione zostaną dwa, kluczowe z punktu widzenia poprawy dokładności pomiarów parametrów fizykochemicznych, algorytmy procesu analizy kształtu kropli [2]:

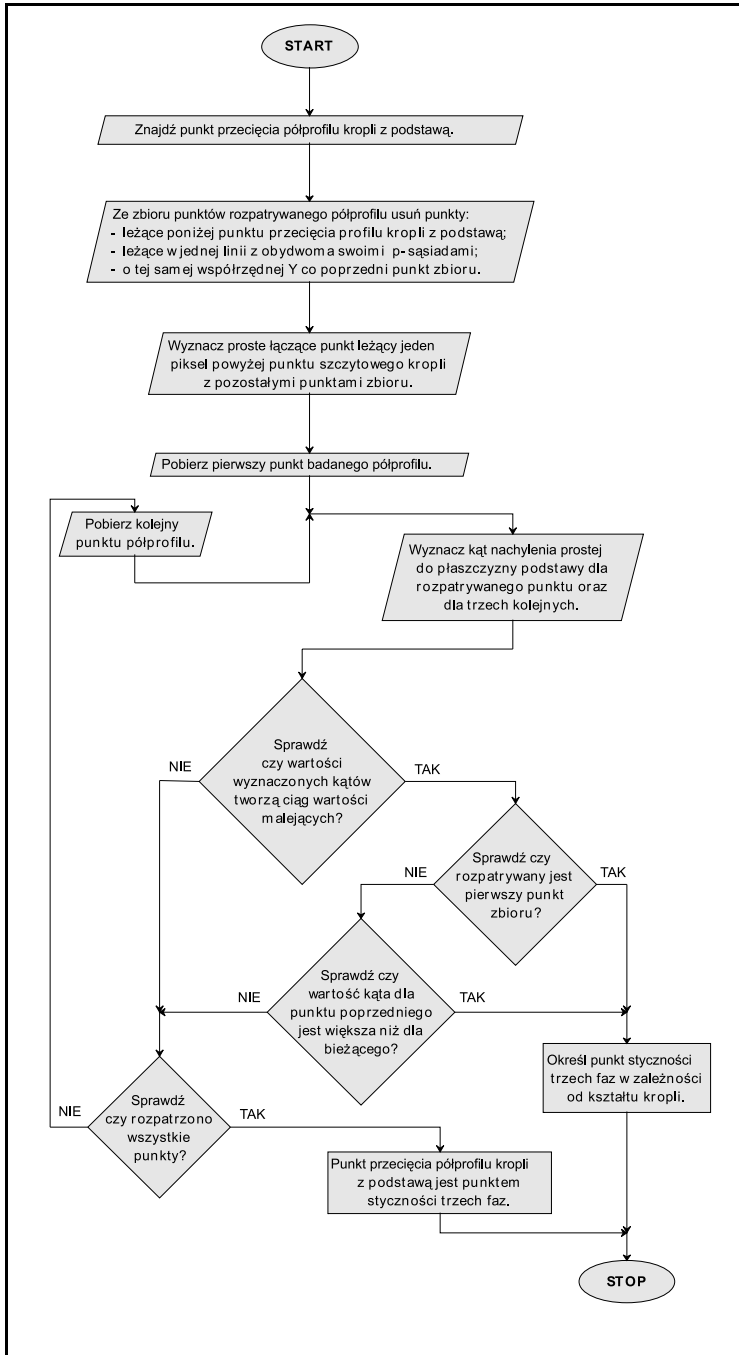
- 1) wyznaczania punktów styczności trzech faz,
- 2) aproksymacji brzegu kropli wielomianem stopnia n .

3. Analiza kształtu kropli

3.1. Algorytm wyznaczania punktów styczności trzech faz

Podstawowym celem tego algorytmu jest zminimalizowanie wpływu zjawiska aury i odbicia, zachodzących w wysokich temperaturach, na błędną klasyfikację punktów obiektu obrazu (rys. 5). Zjawisko aury powoduje silne rozświetlenie, które rozmywa krawędź kropli i stolika, a w obszarze punktów styczności trzech faz dodatkowo ją zniekształca, przez co algorytmy segmentacji błędnie rozpoznają je jako próbkę. W przypadku zjawiska odbicia, dolna część kropli odbija się od powierzchni stolika, co sprawia, że proces segmentacji błędnie klasyfikuje górną część podstawy jako tło obrazu, a odbity fragment kropli jako jej integralną część.

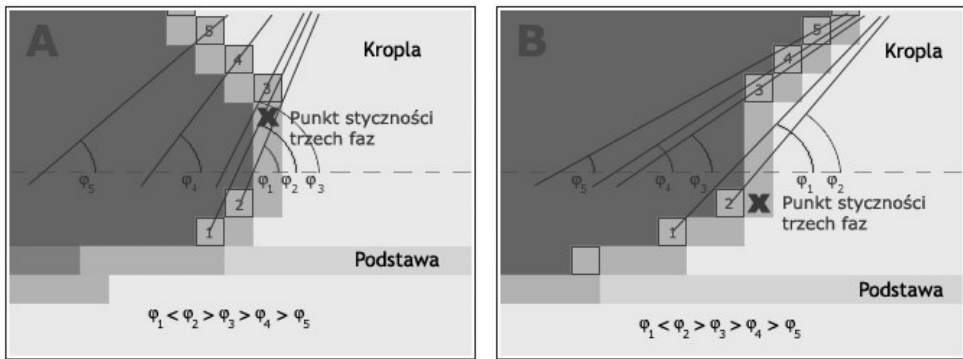
Algorytm przedstawiony na rysunku 2 pozwala na wyznaczenie punktów krawędzi próbki usytuowanych możliwie najbliżej podstawy, a jednocześnie nieobjętych opisanymi zniekształceniami.



Rys. 2. Schemat blokowy algorytmu wyznaczania punktów styczności trzech faz

Działanie algorytmu rozpoczyna się od wyznaczenia domyślnych punktów styczności trzech faz. Etap ten polega na odnalezieniu w zbiorze elementów prawego i lewego półprofilu kropli (poczynając od jej wierzchołka) punktów, które należą do prostej wyznaczającej górną krawędź stolika. Zasadniczą część algorytmu ma na celu odnalezienie zbioru punktów badanego półprofilu, charakterystycznych dla obszaru występowania zniekształceń (rys. 3). Do wyznaczenia tego obszaru niezbędne jest:

- 1) ograniczenie elementów badanego półprofilu do punktów, które:
 - nie leżą poniżej punktu przecięcia profilu kropli z podstawą,
 - nie leżą w jednej linii z obydwojoma swoimi b-sąsiadami,
 - nie posiadają tej samej wartości współrzędnej y , co punkt poprzedni;
- 2) wyznaczenie prostych łączących punkt leżący jeden piksel powyżej punktu szczytowego kropli z pozostałymi punktami półprofilu.



Rys. 3. Obszar występowania zniekształceń wokół punktu styczności trzech faz
Objaśnienia w tekście

Algorytm zakłada, że poszukiwany obszar występowania zniekształceń definiowany jest w jeden z dwóch możliwych sposobów:

- 1) Zbiór czterech pierwszych punktów ograniczonego półprofilu, dla których kolejne wartości kątów nachylenia wyznaczonych prostych tworzą ciąg wartości malejących. Dla tak scharakteryzowanego obszaru, punktem styczności trzech faz badanego półprofilu kropli jest drugi punkt wyznaczonego zbioru.
- 2) Zbiór pięciu kolejnych punktów ograniczonego półprofilu, dla których kolejne wartości kątów nachylenia wyznaczonych prostych spełniają warunek (1) (rys. 3):

$$\varphi_1 < \varphi_2 \wedge \varphi_2 > \varphi_3 > \varphi_4 > \varphi_5 \quad (1)$$

Dla tak scharakteryzowanego obszaru wybór punktu styczności trzech faz zależy od kształtu badanej kropli określanego wartością jej kąta zwilżania:

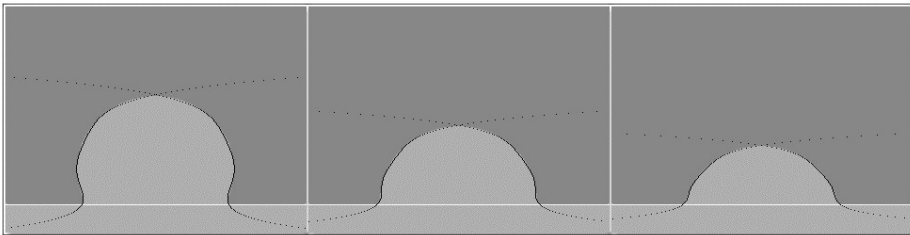
- dla kropli o kącie większym od 90° punktem styczności jest punkt poprzedzający trzeci z pięciu rozpatrywanych punktów ograniczonego półprofilu (rys. 3A);

- dla kropli o kącie zwilżania mniejszym lub równym 90° punkt styczności występuje bezpośrednio po drugim z pięciu rozpatrywanych punktów ograniczonego półprofilu (rys. 3B).

3.2. Aproksymacja brzegu kropli funkcjami wielomianowymi

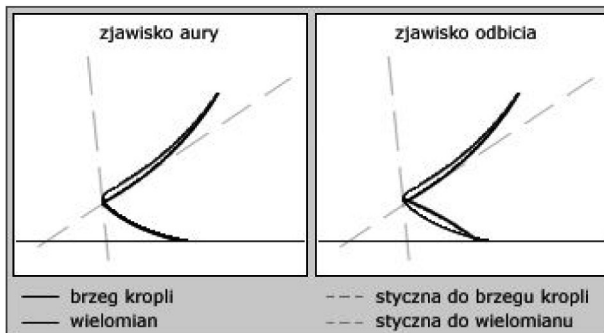
Do obliczenia kąta zwilżania badanej próbki niezbędne jest wyznaczenie kąta zwilżania dla jej lewego i prawego półprofilu. Kąt zwilżania danego półprofilu jest z kolei kątem nachylenia stycznej do krzywej wyznaczającej brzeg próbki w punkcie styczności trzech faz. Do wyznaczenia równania krzywej brzegu próbki niezbędna jest osobna aproksymacja punktów krawędziowych lewego i prawego półprofilu kropli pewną funkcją. Rozróżnienie procesu aproksymacji dla konkretnego półprofilu badanego materiału wynika z własności kształtu całej kropli, który nie pozwala na opisanie go żadną funkcją matematyczną.

Funkcjami aproksymacyjnymi najlepiej odwzorowującymi kształt półprofilu badanych kropli są funkcje wielomianowe stopnia piątego (rys. 4).



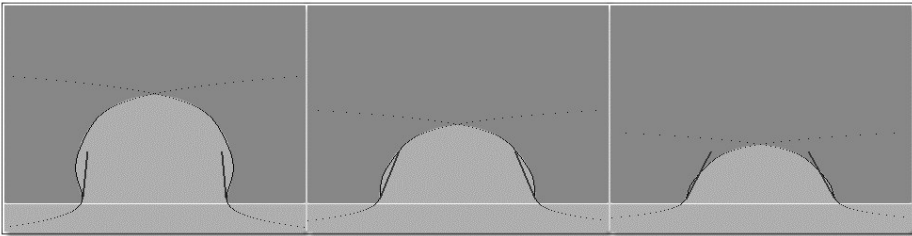
Rys. 4. Aproksymacja brzegu kropli wielomianem stopnia piątego

Niestety przeprowadzenie takiej aproksymacji dla całego półprofilu badanej próbki prowadzi do dużych błędów w obszarze punktów styczności trzech faz, a w tym właśnie obszarze jedynie dokładne odwzorowanie kształtu kropli gwarantuje poprawne wyznaczenie kąta zwilżania. Przyczyną tych błędów jest różnica kształtu pomiędzy krzywą aproksymacyjną a brzegiem kropli w przypadku wystąpienia zjawiska aury lub odbicia (rys. 5).



Rys. 5. Błędna aproksymacja zniekształconego brzegu kropli

Wartość kąta zwilżania danego półprofilu kropli określana jest przez kąt nachylenia stycznej do brzegu kropli w punkcie styczności trzech faz. Z kolei styczną do brzegu kropli może być jedynie prosta nieprzechodząca przez jej punkty wewnętrzne. Dla funkcji wielomianowej, aproksymującej brzeg próbki, wyznaczona styczna przechodzi przez wewnętrzne punkty kropli, a więc jej nachylenie nie może poprawnie określać wartości kąta zwilżania rozpatrywanego półprofilu (rys. 6). W dalszej części omówione zostaną sposoby optymalizacji procesu aproksymacji, pozwalające na poprawne wyznaczenie wartości kąta zwilżania badanej kropli.

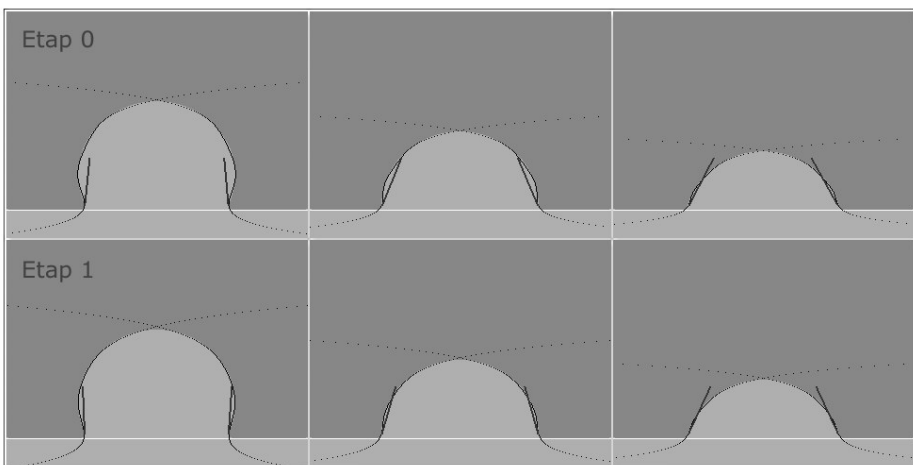


Rys. 6. Wpływ aproksymacji brzegu kropli na wynik wyznaczania kąta zwilżania

Optymalizacja aproksymacji brzegu kropli funkcjami wielomianowymi

Etap 1

Kształt funkcji wielomianowych, otrzymanych w wyniku aproksymacji, charakteryzuje się zauważalną nieregularnością, zmniejszającą dokładność aproksymacji. Nadanie funkcjom aproksymacyjnym bardziej regularnych kształtów zapewni większą dokładność w kolejnych etapach optymalizacji.



Rys. 7. Wynik eliminacji nieregularności kształtu funkcji aproksymujących

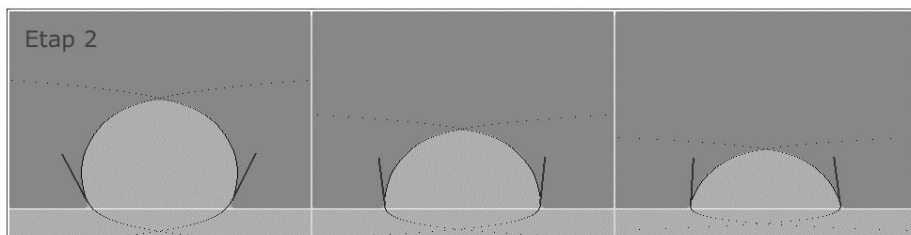
Przyczyną nieregularności kształtu funkcji wielomianowych jest liczność zbioru aproksymowanych punktów. Punktami, które mają najmniejszy wpływ na przebieg funkcji aproksymacyjnych w obszarze punktów styczności trzech faz, są punkty szczytowe kropli. Na drodze eksperymentalnej autor określił, że usunięcie punktów szczytowych ze zbioru punktów aproksymowanych, w liczbie stanowiącej 10% wszystkich punktów rozpatrywanego półprofilu, skutecznie eliminuje zniekształcenia funkcji aproksymacyjnych (rys. 7).

Etap 2

Celem tego etapu optymalizacji jest wyeliminowanie błędów wynikających z kształtu funkcji aproksymującej, który uniemożliwia wyznaczenie stycznych do brzegu kropli w punktach styczności trzech faz.

Rozwiązaniem tego problemu jest przeprowadzenie aproksymacji dla jedynie tych punktów, które wyznaczają krawędź rozpatrywanego półprofilu kropli. Oznacza to, że ze zbioru aproksymowanych punktów należy usunąć te, które leżą poniżej wyznaczonego wcześniej punktu styczności trzech faz. Największą dokładność aproksymacji tak ograniczonego zbioru punktów brzegowych daje aproksymacja funkcjami wielomianowymi stopnia szóstego.

Na drodze eksperymentalnej autor wykazał jednak, że aproksymacja pewnego zbioru punktów funkcją wielomianową obciążona jest błędem w obszarze skrajnych punktów aproksymowanego zbioru. Ponieważ kąt zwilżania jest kątem nachylenia stycznej do krzywej aproksymacyjnej właśnie w skrajnym punkcie aproksymowanego zbioru punktów, wyznaczone kąty zwilżania posiadają wartości zawyżone (rys. 8).

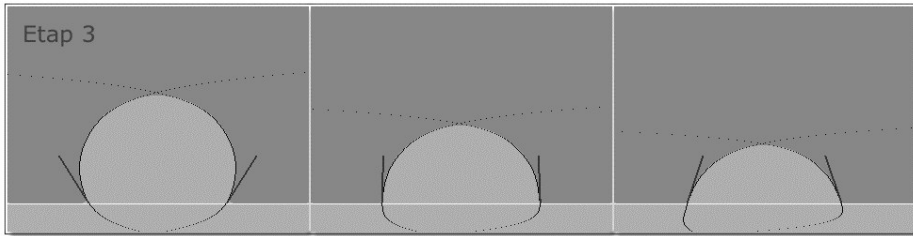


Rys. 8. Wynik aproksymacji po drugim etapie optymalizacji

Etap 3

Ostatni etap optymalizacji eliminuje błąd aproksymacji w obszarze skrajnych punktów aproksymowanego zbioru. Realizacja tego etapu polega na rozszerzeniu aproksymowanego zbioru o dodatkowe punkty, dzięki którym zasięg błędu aproksymacji w obszarze skrajnych punktów aproksymowanego zbioru nie obejmuje punktów styczności trzech faz.

Na drodze eksperymentalnej autor wykazał, że rozszerzenie zbioru aproksymowanych punktów o pięć dodatkowych, symetrycznych względem punktu styczności do pięciu kolejnych punktów półprofilu leżących nad tym punktem, zapewnia przesunięcie obszaru objętego błędem poza domyślny punkt styczności trzech faz (rys. 9).

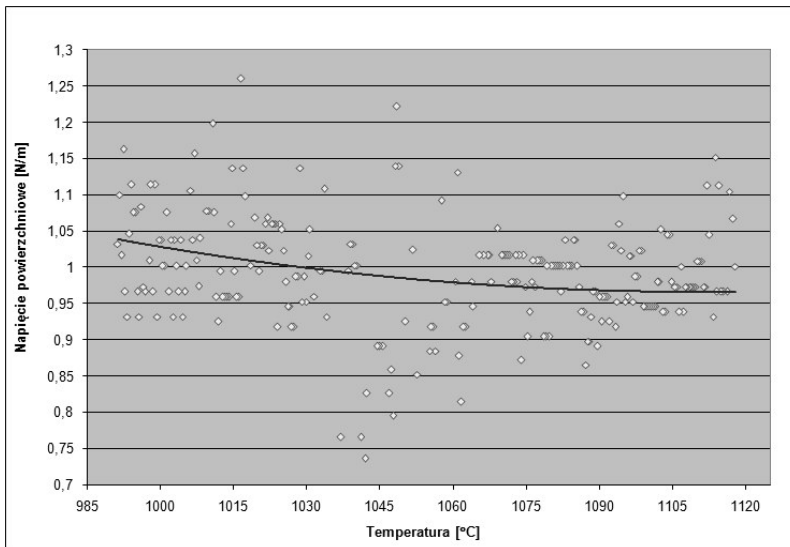


Rys. 9. Wynik zoptymalizowanego procesu aproksymacji brzegu kropli

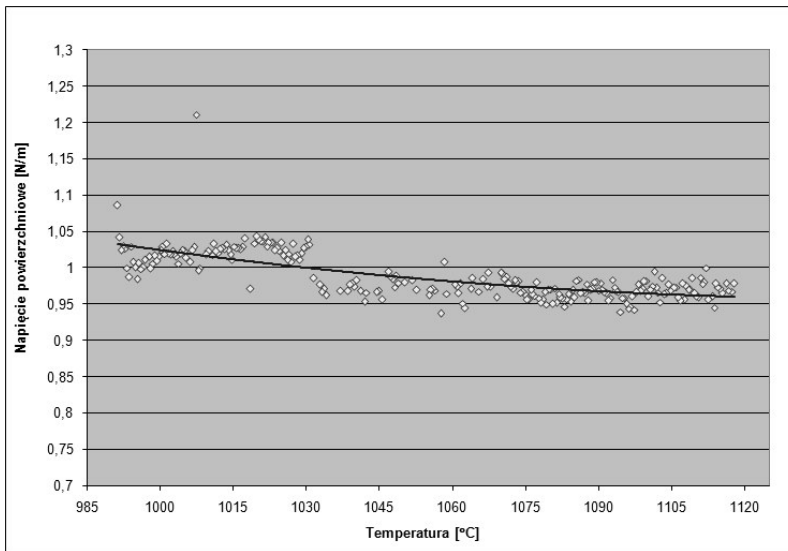
4. Weryfikacja poprawności opracowanych algorytmów

Aby wykazać, że implementacja zaproponowanych algorytmów analizy kształtu kropli na stanowisku badawczym Thermo-Wet zwiększa dokładność wyznaczania parametrów fizykochemicznych badanych próbek, przeprowadzone zostały dwa pomiary napięcia powierzchniowego na podstawie tego samego zbioru obrazów kropli wybranego materiału. W pierwszym pomiarze wykorzystano dotychczasowe algorytmy analizy kształtu kropli (rys. 10), a w drugim algorytmy autorskie (rys. 11).

Oceny dokładności opracowanych algorytmów analizy kształtu kropli dokonano wyznaczając pierwiastek błędu średniokwadratowego oraz średni absolutny błąd procentowy wartości napięcia powierzchniowego otrzymanego z obydwu pomiarów (tab. 1).



Rys. 10. Wyniki obliczeń napięcia powierzchniowego wykonane algorytmami analizy kształtu oprogramowania Thermo-Wet w wersji 1.0



Rys. 11. Wyniki obliczeń napięcia powierzchniowego wykonane autorskimi algorytmami analizy kształtu kropli

Tabela 1
Błędy pomiaru napięcia powierzchniowego

Analiza kształtu kropli – Thermo-Wet v1.0			Autorskie algorytmy analizy kształtu kropli		
RMSE	0,072	[N/m]	RMSE	0,021	[N/m]
MAPE	5,43	[%]	MAPE	1,45	[%]

5. Wnioski

Na podstawie wartości średniego absolutnego błędu procentowego można jednoznacznie stwierdzić, że dokładność autorskich algorytmów analizy kształtu kropli jest większa od algorytmów stosowanych dotychczas. Średni błąd pomiaru nie przekracza 1,5%, a rozrzut mierzonych wartości jest zdecydowanie mniejszy niż w przypadku dotychczasowej metody. Ponadto, wykonanie serii pomiarów wykazało zgodność otrzymanych wartości napięcia powierzchniowego oraz kąta zwilżania z danymi literaturowymi. Stanowi to dowód poprawności działania opracowanych algorytmów.

Literatura

- [1] Missol W., *Energia powierzchni rozdziału faz w metalach*. Wydawnictwo Śląsk, Katowice, 1974.
- [2] Koszmider T., *Zintegrowany system komputerowy do pomiaru cech geometrycznych próbek metali i ich stopów znajdujących się w wysokich temperaturach*. Wydział Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki, Politechnika Łódzka, Łódź, 2009 (rozprawa doktorska).