

KRZYSZTOF STRZECHA**ANNA FABIJAŃSKA****DOMINIK SANKOWSKI****MARCIN BAKAŁA****TOMASZ KOSZMIDER**

Wydział Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki
Politechniki Łódzkiej

THERMO-WET – SKOMPUTERYZOWANY SYSTEM POMIAROWY WŁASNOŚCI FIZYKO-CHEMICZNYCH WYBRANYCH MATERIAŁÓW W WYSOKICH TEMPERATURACH

Recenzent: **dr hab. inż. Marek Orzyłowski**

Maszynopis dostarczono: 1. 10. 2010

W artykule przedstawiono skomputeryzowany system do pomiaru własności fizyczno-chemicznych (kąt zwilżania, napięcie powierzchniowe) wybranych materiałów w wysokotemperaturowych procesach przemian fazowych. Zastosowanie w omówionym systemie, specjalnie opracowanych metod przetwarzania i analizy obrazów, pozwoliło na uzyskanie większej dokładności oraz powtarzalności pomiarów, niż w systemach stosowanych obecnie. Przedstawiona została historia stanowiska oraz aktualnie prowadzone prace rozwojowe.

1. WSTĘP

Napięcie powierzchniowe, energia powierzchniowa fazy ciekłej, kąt zwilżania, w tym skrajny kąt zwilżania podłoża, energia adhezji, napięcie międzyfazowe są parametrami o podstawowym znaczeniu dla nowoczesnych technologii, w wielu dziedzinach techniki, żeby wymienić przykładowo: metalurgię, przemysł szklarski i ceramiczny, inżynierię materiałową, technologię spawalniczą i lutowania.

Znaczeniu zjawisk na granicach faz w różnych dziedzinach techniki poświęcono wiele monografii i artykułów przeglądowych, m.in.: [1-14]. Podstawy teoretyczne dotyczące fizyki zjawisk powierzchniowych oraz metod ich pomiaru można odnaleźć w monografiach: [13, 15-24], a także artykułach przeglądowych [25-32].

Do podstawowych mierzalnych wielkości charakteryzujących oddziaływanie międzyfazowe należą *energia powierzchniowa* (napięcie powierzchniowe) fazy ciekłej i skrajny *kąt zwilżania* podłoża cieczą. Po ich pomiarze można obliczyć pozostałe ważne wielkości badanego układu: energię adhezji, napięcie międzyfazowe i ewentualnie adsorpcję. Pomiarów i obliczeń dokonuje się dla warunków równowagi termodynamicznej. Dla wielu układów równowaga ta nie zostaje jednak w ogóle osiągnięta lub też osiągnięta po technologicznie zbyt długim czasie. Przyczyniają się do tego procesy dyfuzji, rozpuszczania się podłoża w cieczy, tworzenie się nowych związków chemicznych lub faz międzymetalicznych. W takich przypadkach istotnych informacji dostarcza pomiar dynamicznych, zmiennych w czasie wielkości układu w powiązaniu z ewentualną późniejszą analizą strukturalną granicy międzyfazowej.

Badanie procesów występujących na granicach faz stałej i ciekłej, lub ciekłej i ciekłej dwóch różnych materiałów związane jest z szeregiem trudności, wynikających między innymi z aktywności materiałów w stanie ciekłym, konieczności stosowania atmosfer o precyzyjnie kontrolowanym składzie, wrażliwości zjawisk powierzchniowych na zanieczyszczenia, prowadzeniem badań w podwyższonych, wysokich, a nawet bardzo wysokich temperaturach, które muszą być kontrolowane z wysoką dokładnością. W wielu przypadkach konieczne jest śledzenie zmian procesów międzyfazowych w stanach nieustalonych (np. w metalurgii stali na styku stopionego metalu i substancji zużłowych).

Do dziś podstawową metodą oznaczania kąta zwilżania oraz napięcia powierzchniowego była metoda optyczna, bazująca na ciągłej obserwacji kształtu próbki i ręcznym lub fotograficznym rejestrowaniu zmian jej profilu w funkcji temperatury. Zarejestrowane profile analizowane były następnie przez wykwalifikowanego specjalistę, który metodami graficznymi dokonywał pomiaru podstawowych parametrów kropli i na tej podstawie obliczał wartości mierzonych parametrów. Systemy pomiarowe tego typu posiadały szereg wad,

z których najbardziej istotne to: niezwykle pracochłonny i uciążliwy pomiar, wymagający od operatora ciągłej wyęźonej uwagi, a w konsekwencji istotny wpływ czynnika ludzkiego na wyniki pomiaru. Dlatego też na przełomie lat 80-tych i 90-tych zaczęły pojawiać się nowoczesne urządzenia pomiarowe pozwalające częściowo lub całkowicie zautomatyzować proces pomiarowy. Część z nich umożliwia jedynie automatyczną rejestrację przebiegu procesu za pomocą kasety video, lub w pamięci komputera, a obróbka danych pozostaje na ogół w gestii operatora - specjalisty obsługującego urządzenie. Natomiast urządzenia umożliwiające w pełni zautomatyzowany pomiar pozwalają jedynie na pomiar własności wybranych materiałów w wąskim zakresie temperatur, dodatkowo zaimplementowane w nich algorytmy przetwarzania i analizy obrazów nie są odporne na zakłócenia i wymagają precyzyjnego umiejscowienia próbki badanego materiału [27-28, 33-46].

2. STANOWISKO BADAWCZE THERMO-WET

W ramach grantu KBN nr 8 T10C 005 14 w latach 1998-2000 w Katedrze Informatyki Stosowanej Politechniki Łódzkiej przy współpracy Instytutu Spajania Politechniki Warszawskiej oraz Przemysłowego Instytutu Elektroniki w Warszawie zostało opracowane i zbudowane stanowisko do zautomatyzowanych pomiarów kąta zwilżania i napięcia powierzchniowego „THERMO-WET” [47-53]. W pracach udział brali: dr inż. Krzysztof Strzecha i dr inż. Sławomir Jeżewski z Katedry Informatyki Stosowanej, prof. dr hab. inż. Jacek Senkara i dr inż. Jerzy Jakubowski z Zakładu Inżynierii Spajania Politechniki Warszawskiej oraz dr inż. Marek Grzybek, mgr inż. Wojciech Łobodziński i mgr inż. Tomasz Gozdecki z Przemysłowego Instytutu Informatyki w Warszawie. Zespołem badawczym kierował prof. dr hab. inż. Dominik Sankowski z Katedry Informatyki Stosowanej Politechniki Łódzkiej. Zbudowane w ramach w/w współpracy zautomatyzowane stanowisko badawcze „THERMO-WET” umożliwia prowadzenie pomiarów następujących parametrów:

- kąta zwilżania (w tym skrajnego kąta zwilżania);
- napięcia powierzchniowego (energii powierzchniowej).

Parametry te wyznaczane są metodą leżącej kropli, dla warunków równowagi termodynamicznej oraz w przypadku stanów nieustalonych w funkcji czasu i temperatury.

Badania te mogą być prowadzone w kontrolowanej atmosferze, w zakresie temperatur do 1750°C, dla układów międzyfazowych ciało stałe - ciecz dla dwóch różnych materiałów.

Proces pomiarowy przebiega w oparciu o specjalistyczne, zaprojektowane specjalnie dla potrzeb stanowiska pomiarowego, algorytmy przetwarzania i analizy obrazów pozyskanych z kamery obserwującej próbkę badanego materiału umieszczoną wewnątrz komory pieca wysokotemperaturowego.

Uzyskane z wykorzystaniem omawianego stanowiska wyniki pomiarów odznaczają się dużo większą dokładnością oraz wysoką powtarzalnością w porównaniu z uzyskiwanymi przy pomocy dotychczas stosowanych, czasochłonnych metod, zależnych od subiektywnych ocen operatora systemu pomiarowego.

Opracowane stanowisko pomiarowe nie było jednak wolne od wad, w krótkim czasie okazało się, że najważniejsze z nich to:

- niskiej jakości architektura oprogramowania znacząco utrudniająca wszelkie zabiegi pielęgnacyjne;
- niska stabilność oprogramowania;
- brak zgodności z nowoczesnymi urządzeniami pozyskiwania obrazów;
- brak zgodności z nowoczesnymi systemami operacyjnymi.

Krótko po zakończeniu projektu, naukowcy z Katedry Informatyki Stosowanej przystąpili do prac mających na celu usunięcie powyższych niedoskonałości, a także zwiększenie dokładności i powtarzalności uzyskiwanych wyników. W efekcie w okresie kilku ostatnich lat dokonano wielu zmian, zarówno w budowie jak i w oprogramowaniu stanowiska THERMO-WET. Najbardziej znaczące z nich to:

- oprogramowanie stanowiska pomiarowego zostało w całości napisane od nowa, jego architektura została starannie zaprojektowana tak, aby zapewnić wysoką stabilność, elastyczność i funkcjonalność aplikacji [54-55];
- opracowano i zaimplementowano nowe algorytmy przetwarzania i analizy obrazów zapewniające dużo wyższą dokładność i powtarzalność uzyskiwanych wyników [56-59];
- opracowano nowy system archiwizacji wyników pomiarów oparty na bazie danych zgodnej ze standardem SQL;
- regulatory temperatury zastąpione zostały jednym, w pełni zgodnym z protokołem MODBUS, co pozwoliło na zunifikowanie komunikacji ze wszystkimi modułami sprzętowymi urządzenia pomiarowego;
- komputer wbudowany w stanowisko pomiarowe oraz jego oprogramowanie zostały zaprojektowane i zaimplementowane od nowa, tak aby w pełni wspierały zunifikowaną komunikację z regulatorem temperatury i zmieniaczem filtrów podczerwonych. Obecna architektura komputera wbudowanego charakteryzuje się wysoką elastycznością umożliwiającą łatwe przeprowadzanie zmian w istniejących modułach sprzętowych stanowiska THERMO-WET oraz dodawanie nowych modułów.

W pracach udział brali: dr inż. Tomasz Koszmider, dr inż. Anna Fabijańska, dr inż. Marcin Bąkała i dr inż. Krzysztof Strzecha.

W rezultacie przeprowadzonych prac, w 2008 roku stanowisko THERO-WET stało się stabilnym i elastycznym środowiskiem pomiarowym.

3. BUDOWA STANOWISKA BADAWCZEGO

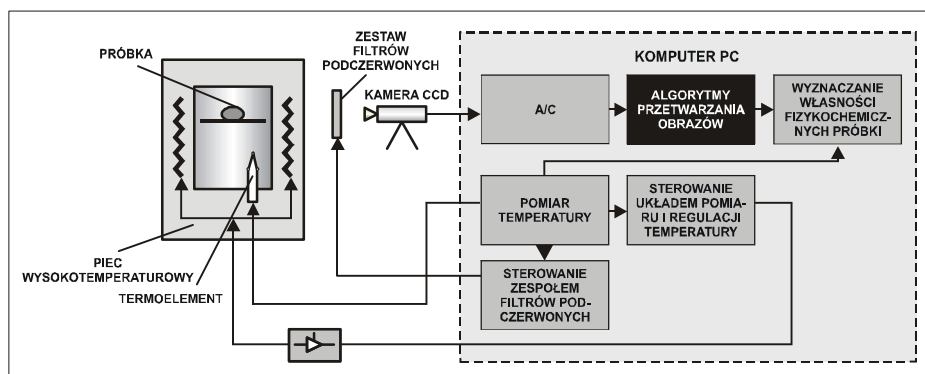
Ogólny widok systemu badawczego „THERMO-WET” przedstawia fotografia na rys. 1.



Rys. 1. Widok ogólny zautomatyzowanego stanowiska do pomiarów napięcia powierzchniowego i kątów zwilżania: 1 - wysokotemperaturowy dwustrefowy piec elektryczny; 2 - precyzyjny system kaskadowej programowej regulacji temperatury; 3 - układ zasilania gazami technologicznymi; 4 - system załadowczo-wyładowczy próbki; 5 - kamera CCD; 6 - komputer sterującym procesem pomiarowym

Stanowisko badawcze składa się z wysokotemperaturowego dwustrefowego pieca elektrycznego (1) wyposażonego w precyzyjny system kaskadowej programowej regulacji temperatury (2) oraz układ zasilania gazami technologicznymi (3), systemu załadowczo-wyładowczego próbki (4), kamery CCD (5) sprzężonej z komputerem sterującym procesem pomiarowym (6), wyposażonym w system specjalistycznych programów rozpoznawania i analizy

obrazu, matematycznej obróbki danych, edycji i archiwizacji wyników. Schemat blokowy stanowiska badawczego przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Schemat blokowy zautomatyzowanego stanowiska badawczego

4. OPROGRAMOWANIE STANOWISKA BADAWCZEGO

Komputer w urządzeniu „THERMO-WET” pełni podwójną rolę: steruje automatyką całego stanowiska (regulatory temperatury, zmieniacz filtrów podczerwonych) i jest jednocześnie centrum przetwarzania informacji obrazowej. Oprogramowanie stanowiska zostało w całości napisane w języku C++ i jest przeznaczone do pracy pod kontrolą systemu operacyjnego Windows.

W oprogramowaniu stanowiska można wyróżnić następujące bloki funkcjonalne:

- *Planowania i kontroli nad przebiegiem eksperymentu.* Blok ten umożliwia przeprowadzającemu eksperyment wprowadzenie danych uwzględniających: rodzaj atmosfery ochronnej, materiał próbki i podłoża, temperaturę początkową i końcową eksperymentu, prędkość narastania temperatury, masę próbki oraz gęstość gazu (atmosfery ochronnej). Jest również odpowiedzialny za kontrolę nad przebiegiem całego procesu pomiarowego.
- *Sterowania układem pomiaru i regulacji temperatur w piecu rurowym.* Komunikacja programu z regulatorem temperatury odbywa się poprzez port szeregowy z wykorzystaniem standardowego protokołu MODBUS. Możliwe są następujące nastawy: temperatury elementu grzejnego, limitu mocy, nastaw regulatora PID, okresu regulacji. Blok umożliwia również odbiór następujących informacji wysyłanych przez regulatory: temperatury elementu grzejnego, temperatury wsadu, aktualnej temperatury zadanej i aktualnej mocy.

- *Sterowania zmieniaczem filtrów.* Zmiana filtra podczerwonego może następować automatycznie, bądź na życzenie operatora stanowiska badawczego [60]. Komputer komunikuje się ze zmieniaczem filtrów poprzez port szeregowy wykorzystując standardowy protokół przemysłowy MODBUS.
- *Pozyskania obrazu.* Blok funkcjonalny *pozyskania* obrazu umożliwia poprzez obsługę kart *frame-grabber* pozyskanie obrazu pochodzącego z kamery CCD.
- *Przetwarzania i analizy obrazu.* Zadaniem bloku przetwarzania i analizy obrazu jest takie wstępne przetworzenie i analiza danych obrazowych dostarczonych przez blok pozyskania obrazu, aby w dalszej kolejności możliwe było dokonanie pomiaru własności fizyczno-chemicznych badanego materiału [52, 56, 59, 61-62].
- *Wyznaczania parametrów fizyczno-chemicznych badanych próbek.* Blok umożliwia wyznaczenie podstawowych parametrów fizyczno-chemicznych próbki w stanie ciekłym: kąta zwilżania podłoża materiałem próbki i napięcia powierzchniowego próbki (energii powierzchniowej) [52, 59, 63-65].
- *Archiwizacji wyników pomiarów.* Do celów archiwizacji wyników pomiarów i obrazów źródłowych wykorzystana została niezależna baza danych zgodna ze standardem SQL.

5. OBECNE PRACE ROZWOJOWE

Zarówno prace konstrukcyjne i rozwojowe, jak i użytkowanie stanowiska THERMO-WET wskazały wiele możliwych dróg jego dalszego rozwoju. Sprawą najwyższej wagi było oczywiście uzyskanie w pełni funkcjonalnego stanowiska pomiarowego, dlatego też w pierwszej kolejności zaimplementowane zostały najważniejsze, krytyczne z punktu widzenia poprawności działania stanowiska funkcje. Obecnie, w chwili, gdy weszliśmy w posiadanie w pełni funkcjonalnego i stabilnego środowiska pomiarowego mamy możliwość pełnego przetestowania większości naszych nowych pomysłów i wprowadzenia ewentualnych zmian. Głównymi celami obecnie prowadzonych prac rozwojowych nad stanowiskiem THERMO-WET są:

- rozszerzenie funkcjonalności urządzenia poprzez umożliwienie prowadzenia pomiarów w temperaturach poniżej 700°C; ma to szczególne znaczenie w świetle Dyrektywy 2002/95/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 27.01.2003 roku w sprawie ograniczenia stosowania niektórych niebezpiecznych substancji w sprzęcie elektrycznym i elektronicznym,

- nakazującej ograniczyć stosowanie lutów ołowiowo-cynowych, szeroko stosowanych dotychczas w przemyśle elektronicznym i elektrotechnicznym;
- dalsza automatyzacja procesu pomiarowego poprzez pełną automatyzację sterowania podajnikiem próbek i podsystemem wizyjnym;
 - poprawa dokładności i powtarzalności uzyskiwanych wyników poprzez eliminację lub korektę błędów wprowadzanych przez komponenty podsystemu wizyjnego urządzenia.

Prace te prowadzone są w ramach grantu Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego przez zespół w składzie nr N N519 403037: dr inż. Krzysztof Strzecha, dr inż. Anna Fabijańska, dr inż. Tomasz Koszmider, dr inż. Marcin Bąkała.

Do osiągnięcia wyżej zdefiniowanych celów niezbędne są zarówno zmiany sprzętowe jak i w oprogramowaniu stanowiska badawczego THERMO-WET.

5.1. Nowe idee i rozwiązania sprzętowe

Zespół badawczy rozważał wiele możliwych zmian w budowie stanowiska pomiarowego. Niestety ze względu na ograniczone fundusze zmuszony był wybrać do realizacji jedynie te, które uznał za najważniejsze z punktu widzenia funkcjonalności i stabilności urządzenia oraz dokładności i powtarzalności uzyskiwanych wyników [66].

5.1.1. Podstawa podsystemu wizyjnego

Podstawa podsystemu wizyjnego została zaprojektowana od nowa. Projekt nowej konstrukcji przedstawiony został na rys. 3. Jej najbardziej znaczącą nową własnością jest możliwość precyzyjnego pozycjonowania kamery CCD. Jej położeniem sterować będą trzy silniki krokowe nadzorowane przez główny komputer stanowiska pomiarowego. Komunikacja pomiędzy komputerem nadrzędnym, a podstawą systemu wizyjnego przebiegała będzie z wykorzystaniem protokołu MODBUS.

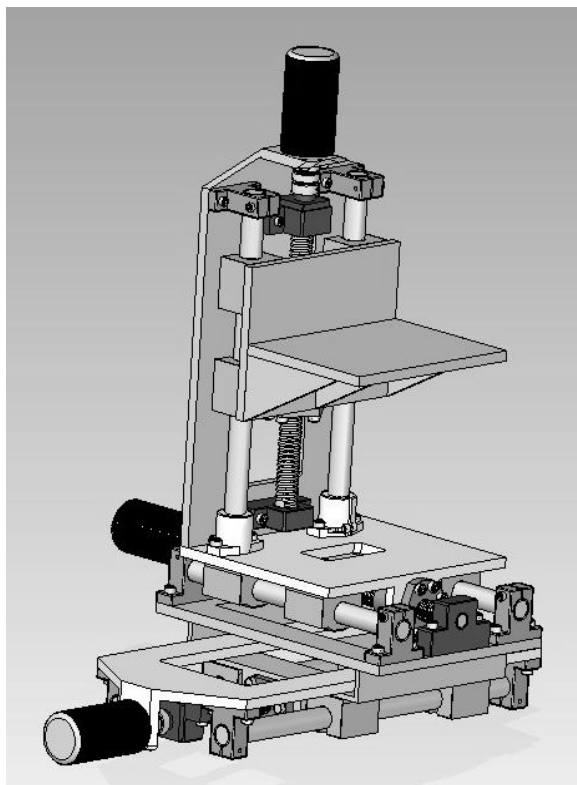
5.1.2. Podajnik próbek

Zmiany konstrukcyjne podajnika próbek umożliwią ich płynne wprowadzanie do komory grzejnej pieca. Pozycja próbki będzie określana i kontrolowana z wysoką precyzją przez dwa silniki krokowe sterowane przez główny komputer stanowiska pomiarowego, przy czym komunikacja także

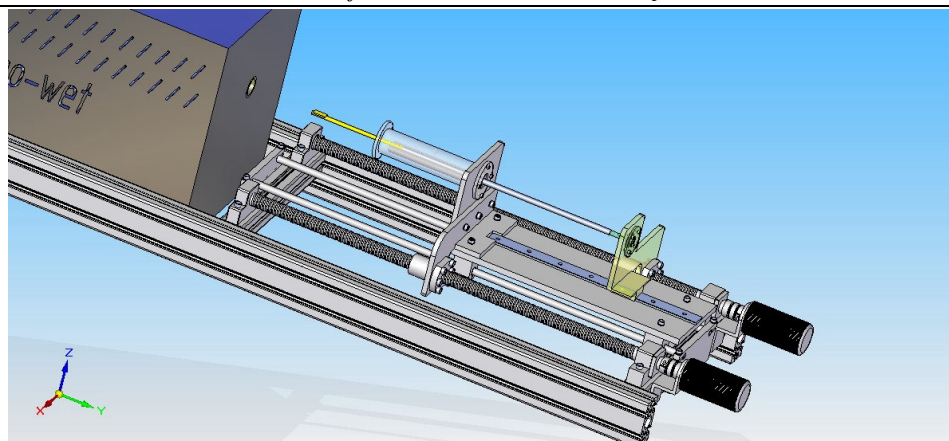
w tym przypadku będzie oparta na protokole MODBUS. Projekt nowej konstrukcji podajnika próbek przedstawiony został na rys. 4. Dodatkowo, nowy mechanizm wykazywać się będzie dużą odpornością na drgania podłoża.

Możliwość precyzyjnego ustalenia wzajemnego położenia kamery i badanej próbki powinna pozwolić na znaczące zwiększenie dokładności i powtarzalności wyników pomiarowych. Podobny wpływ powinna mieć dużo niższa czułość urządzenia na drgania podłoża.

Dodatkowo możliwość automatycznego pozycjonowania kamery podczas eksperymentów pomiarowych umożliwi zaimplementowanie algorytmu *auto-focus*. Konieczność jego wprowadzenia została uzasadniona w dalszej części artykułu.



Rys. 3. Projekt nowej konstrukcji podstawy podsystemu wizyjnego



Rys. 4. Projekt nowej konstrukcji podajnika próbek

5.1.3. Kamery termowizyjne

Kamery CCD obecnie używane w stanowisku pomiarowym THERMO-WET wprowadzają do procesu pomiarowego szereg ograniczeń. Zastąpienie ich kamerami termowizyjnymi powinno pomóc wyeliminować większość z nich.

Odpowiedni dobór kamer termowizyjnych powinien umożliwić:

- wyeliminowanie filtrów podczerwonych, a tym samym wyeliminowanie wprowadzanych przez nie błędów do pozyskiwanych obrazów;
- precyzyjny pomiar temperatury próbki;
- przynajmniej częściowe wyeliminowanie zjawiska „aury” poprzez wykorzystanie kamer wąskopasmowych ($0.8\text{--}1.1\mu\text{m}$), a tym samym na dużo dokładniejszą lokalizację krawędzi próbki w obrazie;
- rozszerzenie zakresu temperaturowego poniżej 700°C .

5.2. Nowe idee i rozwiązania w oprogramowaniu

Przedstawione poniżej zmiany w oprogramowaniu stanowiska badawczego THERMO-WET są niezbędne dla pełniejszej automatyzacji procesu pomiarowego oraz dla zwiększenia dokładności i powtarzalności uzyskiwanych wyników [66].

5.2.1. Algorytmy sterowania nowymi modułami sprzętowymi

Wszystkie zmiany sprzętowe opisane wcześniej wymagają opracowania i zaimplementowania odpowiednich algorytmów sterowania w oprogramowaniu stanowiska badawczego. W efekcie zarówno pozycjonowanie kamery jak i próbki badanego materiału stanie się integralnym elementem procesu pomiarowego.

5.2.2. Korekcja błędów wprowadzanych przez podsystem wizyjny

Oddzielną grupę stanowią algorytmy dedykowane do korekcji błędów i zakłóceń wprowadzanych przez poszczególne elementy podsystemu wizyjnego stanowiska pomiarowego. Przetworniki foto-elektryczne stosowanych obecnie w stanowisku THERMO-WET kamer CCD wpływają negatywnie na jakość pozyskiwanych obrazów poprzez:

- napięcie podkładowe;
- obecność szumu ciemnego (termicznego);
- obecność innych rodzajów szumu (np. szumu odczytu, fotonowego);
- obecność martwych i gorących pikseli;
- nierównomiernego rozkładu czułości pikseli w matrycy przetwornika.

Inne czynniki mające znaczący negatywny wpływ na jakość pozyskiwanych w procesie pomiarowym obrazów to:

- nieliniowe charakterystyki filtrów podczerwonych;
- aberracje optyczne (sferyczna, chromatyczna, komatyczna) układu optycznego.

Na przestrzeni kilku ostatnich lat zespół badawczy opracował szereg algorytmów mających na celu eliminację wpływu wymienionych wyżej czynników. Algorytmy te zostały szczegółowo opisane w [60-61].

5.2.3. Korekcja wpływu atmosfery ochronnej

Dla większości badanych materiałów zachodzi konieczność prowadzenia pomiarów napięcia powierzchniowego i kątów zwilżania w atmosferze ochronnej. Przepływ gazu ochronnego wprowadza szereg znaczących zniekształceń do pozyskiwanych obrazów. Gaz wprowadzany jest do komory pieca od strony podsystemu wizyjnego i posiada temperaturę ok. 280K, następnie na drodze do próbki jest podgrzewany do aktualnej temperatury, w jakiej prowadzony jest eksperyment, np. 1500K.

Wartość względnego współczynnika załamania światła n w gazie zależy od jego gęstości i temperatury. Dla temperatury powyżej 280K i dla ciśnienia atmosferycznego opisany jest zależnością:

$$\Delta n = \frac{k_1 \gamma}{T}, \quad (1)$$

gdzie: γ - gęstość gazu,

T - temperatura bezwzględna,

k_1 - stała.

Zgodnie z prawem Boyle-Mariotte'a, przy stałym ciśnieniu gęstość gazu jest odwrotnie proporcjonalna do jego temperatury bezwzględnej:

$$\Delta n = \frac{k_2}{T^2}, \quad (2)$$

gdzie: k_2 - stała.

Zgodnie z równaniem (2), w przytoczonym wyżej przykładzie, gdzie temperatura gazu rośnie od 280K do 1800K, na drodze od miejsca jego wprowadzenia do próbki, wartość Δn zmniejsza się blisko 40-krotnie.

W efekcie należy przyjąć, że gaz wprowadzony do kamery pieca powinien być rozważany jako soczewka optyczna, której współczynnik załamania zmienia się w funkcji odległości od kamery obserwującej próbkę.

Należy zaznaczyć, że zaprezentowany model „soczewki gazowej” jest modelem bardzo uproszczonym. W rzeczywistości parametry takiej soczewki silnie zależą od wielu czynników takich jak: parametry przepływu gazu, skład atmosfery ochronnej i rozkład temperatur w komorze pieca. Dodatkowo, parametry te zwykle zmieniają się w trakcie trwania eksperymentu pomiarowego.

Najprostszym rozwiązaniem, mogącym w znaczącym stopniu ograniczyć wpływ „soczewki gazowej” na jakość pozyskiwanych obrazów jest opracowanie i zaimplementowanie działającego w czasie rzeczywistym algorytmu *auto-focus*.

Algorytm taki niestety nie będzie w stanie dokonać korekty wszystkich negatywnych czynników związanych z przepływem gazu. Jednym z najważniejszych jest zjawisko „aury”. Nad wyjaśnieniem tego zjawiska i zbudowaniem odpowiedniego modelu prowadzone są obecnie prace przy współpracy fizyków z Zespołu Elektroniki Kwantowej i Optyki Nieliniowej Instytutu Fizyki Politechniki Łódzkiej pod kierownictwem dr inż. Kazimierza Roźniakowskiego.

5.2.4. Sub-pikselowa lokalizacja próbki

Precyzja lokalizacji próbki badanego materiału w scenie oraz dokładność pomiaru jej parametrów geometrycznych ma krytyczne znaczenie dla dokładności uzyskiwanych wyników pomiaru właściwości powierzchniowych. Wynika to z faktu, że wymiary charakterystyczne próbki stanowią podstawę do wyznaczenia napięcia powierzchniowego, natomiast profil próbki w punkcie styku trzech faz decyduje o wyznaczonych wartościach kątów zwilżania. Tradycyjne metody przetwarzania obrazów wydają się niewystarczające dla spełnienia wymagań dotyczących dokładności pomiarów. W przypadku obrazów pochodzących z systemu „THERMO-WET” podstawowym problemem jest niejednoznaczność wyników otrzymywanych przy próbie określenia profilu próbki. W szczególności, tradycyjne metody detekcji krawędzi dostarczają różnych wyników dla tego samego obrazu [62, 65]. Stan ten jest w dużej mierze spowodowany wspomnianym wcześniej zjawiskiem „aury”.

Aby system „THERMO-WET” mógł sprostać współczesnym wymaganiom dokładnościowym, powinien dokonywać z niezwykle wysoką dokładnością analizy obiektów, kalibracji, poszukiwania krawędzi, oraz pomiaru. Dlatego też, aktualne prace rozwojowe w dziedzinie ulepszenia oprogramowania, koncentrują się na opracowaniu algorytmu segmentacji, który pozwoli na jednoznaczne określenie profilu próbki z sub-pikselową dokładnością.

Techniki sub-pikselowe są rzadko opisywane w publikacjach dotyczących klasycznego przetwarzania obrazów. Od dawna natomiast są stosowane w geodezji (do opracowywania zdjęć lotniczych i satelitarnych w celu wytworzenia orto-fotomapy), kartografii a także w fotogrametrii i teledetekcji.

Przetwarzanie i analiza sub-pikselowa stosowane są głównie w przypadku obrazów o wyraźnie zaznaczonych krawędziach lub zawierających obiekty o z góry znanym kształcie [67]. W takich przypadkach metody te pozwalają na zlokalizowanie krawędzi obiektu z rozdzielczością przekraczającą nominalną rozdzielczość analizowanego obrazu. W wyniku takiego podejścia możliwa jest znacząca poprawa (czasem nawet o rząd wielkości!) dokładności lokalizacji określonych struktur na dyskretnym cyfrowym rastrze. Ponadto, zmniejszeniu ulegają ograniczenia narzucane przez dyskretną strukturę tego rastra. W konsekwencji, możliwa jest znacząca poprawa dokładności określania wymiarów obiektów znajdujących się na poddawanej analizie scenie oraz lokalizacji ich krawędzi.

W przypadku obrazów pochodzących z systemu „THERMO-WET”, przedstawiających ciekłe próbki metali emitujących intensywne promieniowanie termiczne, kształt próbki jest z góry znany. Podstawowym problemem jest znacząco rozmyta krawędź pomiędzy próbką a tłem. Jednak, dotychczasowe prace nad algorytmem, który z wykorzystaniem technik aproksymacyjnych

sprowadza przybliżoną krawędź do poziomu sub-pikselowego dały bardzo obiecujące wyniki.

6. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono skomputeryzowany system do pomiaru własności fizyczno-chemicznych (kąąt zwilżania, napięcie powierzchniowe) wybranych materiałów w wysokotemperaturowych procesach przemian fazowych. Zastosowanie w omówionym systemie, specjalnie opracowanych metod przetwarzania i analizy obrazów, pozwoliło na uzyskanie większej dokładności oraz powtarzalności pomiarów, niż w systemach stosowanych obecnie. Przedstawiona została historia stanowiska oraz aktualnie prowadzone prace rozwojowe. Prace te mają na celu zarówno rozszerzenie funkcjonalności stanowiska pomiarowego, jak i zwiększenie dokładności i powtarzalności uzyskiwanych wyników.

LITERATURA

- [1] **Metcalf A.G.:** Interfaces in metal-matrix composites. New York, Academic Press, 1981.
- [2] **Pask J., Evans A. (ed.):** Surfaces and interfaces in ceramic and ceramic-metal systems. New York, Plenum Publishing Co., 1981.
- [3] **Matsunawa A., Ohji T.:** Role of surface tension in fusion welding, Part I. Transactions of Japan Welding Research Institute. Vol. 11, 1982, pp. 145-154.
- [4] **Matsunawa A., Ohji T.:** Role of surface tension in fusion welding, Part II. Transactions of Japan Welding Research Institute. Vol. 12, 1983, pp. 123-130.
- [5] **Matsunawa A., Ohji T.:** Role of surface tension in fusion welding, Part III. Transactions of Japan Welding Research Institute. Vol. 13, 1984, pp. 147-156.
- [6] **Dellannay F., Froyen L., Deruyttere A.:** The wetting of solids by molten metals and its relation to the preparation of metal-matrix composites. Journals of Material Science, Vol. 22, 1987, pp. 1-16.
- [7] **Baglin J.E.E.:** Thin film adhesion: new possibilities for interface engineering. Material Science and Engineering. Vol. B-1, 1988, pp. 1-7.
- [8] **Nicholas M.G. (ed.):** Joining of ceramics. London, Chapman & Hall, 1990.
- [9] **Senkara J., Windyga A.:** Podstawy teorii procesów spajania. Warszawa, Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, 1990.
- [10] **Mortensen A.:** Interfacial phenomena in the solidification processing of metal-matrix composites. Material Science and Engineering. Vol. A-135, 1991, pp. 1-11.
- [11] **Hosking M., Yost F.G.:** The mechanics of solder alloy wetting & spreading. Springer, 1993.
- [12] **Nicholas M.G.:** Joining processes. Springer, 1998.

- [13] **Deyev G.F.:** Surface phenomena in fusion welding processes. CRC Press, 2005.
- [14] **Evans J.W.:** Guide to lead-free solders: physical metallurgy and reliability. Springer, 2007.
- [15] **Woodruff D.P.:** The solid-liquid interface. Cambridge, Cambridge University Press, 1973.
- [16] **Missol W.:** Energia powierzchni rozdziału faz w metalach. Katowice, Wydawnictwo Śląsk, 1974.
- [17] **Murr L.E.:** Interfacial phenomena in metals and alloys. Reading, Addison-Wesley Publishing Co., 1975.
- [18] **Adamson A.W., Gast A.P.:** Physical chemistry of surfaces. New York, Wiley-Interscience, 1997.
- [19] **Eustathopoulos N., Nicholas M.G., Drevet B.:** Wettability at high temperatures. Pergamon, 1999.
- [20] **Bechstedt F.:** Principles of surface physics. Springer, 2003.
- [21] **DeGennes P., Brochard-Wyart F., Quere D.:** Capillarity and wetting phenomena: drops, bubbles, pearls, waves. Springer-Verlag, 2003.
- [22] **Hartland S.:** Surface and interfacial tension: measurement, theory, and applications. CRC, 2004.
- [23] **Butt H.J., Graf K., Kappl M.:** Physics and chemistry of interfaces. Wiley-VCH, 2006.
- [24] **Erbil H.Y.:** Surface chemistry of solid and liquid interfaces. Wiley-Blackwell, 2006.
- [25] **Kinloch A.J.:** Review: The science of adhesion. Journals on Material Science. Vol. 15, 1980, pp. 2141-2166.
- [26] **DeGennes P.G.:** Wetting: statics and dynamics. Reviews of Modern Physics 57. Vol. 3, 1985, pp. 827-863.
- [27] **Hansen F.K.:** Surface tension by image analysis: fast and automatic measurements of pendant and sessile drops and bubbles. Journal of Colloid and Interface Science. Vol. 160, 1993, pp. 209-217.
- [28] **Bachevsky R.S., Naidich Y.V., Grygorenko M.F., Dostojny V.A.:** Evaluation of errors in automatic image analysis determination of sessile drop shapes. Proc. Int. Conf.: High Temperature Capillarity (Poland, Smolenice Castle), 1994, pp. 254-58.
- [29] **Holgado-Terriza J.A., Gomez-Lopera J.F., Luque-Escamilla P.L.:** Measurement of ultralow interfacial tension with ADSA using an entropic edge-detector. Colloids and Surfaces. Vol. 156, 1999, pp. 579-586.
- [30] **Wulf M., Michael S., Grundke K.:** Simultaneous determination of surface tension and density of polymer melts using axisymmetric drop shape analysis. Journal of Colloid and Interface Science. Vol. 210, 1999, pp. 172-181.
- [31] **Kwok D.Y., Neumann A.W.:** Contact angle interpretation in terms of solid surface tension. Colloid Surfaces, Physicochemical Engineering Aspects. Vol. 161, 2000, pp. 31-48.
- [32] **Zuo Y.Y., Ding M., Bateni A., Hoorfar M., Neumann A.W.:** Improvement of interfacial tension measurement using a captive bubble in conjunction with axisymmetric drop shape analysis (ADSA). Colloids Surfaces A: Physicochemical Engineering Aspects. Vol. 250, 2004, pp. 233-246.

- [33] **Huh C., Reed R.L.:** A method for estimating interfacial tensions and contact angles from sessile and pendant drop shapes. *Journal of Colloid and Interface Science*. Vol. 9, 1983, pp. 1472-1484.
- [34] **Rotenberg Y., Boruvka L., Neumann A.W.:** Determination of surface tension and contact angle from the shapes of axisymmetric fluid interfaces. *Journal of Colloid and Interface Science*. Vol. 93, 1983, pp. 169-183.
- [35] **Girault H., Schiffrin D.J., Smith B.J.:** The measurement of interfacial tension of pendant drops using a video image profile digitizer. *Journal of Colloid and Interface Science*. Vol. 101, 1984, pp. 257-266.
- [36] **Anastasiadis S.H., Chen J.K., Koberstein J.T., Siegel A.F., Sohn J.E., Emerson J. A.:** The determination of interfacial tension by video image processing of pendant fluid drops. *Journal of Colloid and Interface Science*. Vol. 119, 1987, pp. 55-66.
- [37] **Cheng P., Li D., Boruvka L., Rotenberg Y., Neumann A.W.:** Automation of axisymmetric drop shape analysis for measurement of interfacial tensions and contact angles. *Colloid Surfaces*. Vol. 43, 1990, pp. 151-167.
- [38] **Pallas N.R., Harrison Y.R.:** An automated drop shape apparatus and the surface tension of pure water. *Colloids Surfaces*. Vol. 43, 1990, pp. 169-194.
- [39] **Hansen F.K. Rodsrud G.:** Surface tension by pendant drop. *Journal of Colloid and Interface Science*. Vol. 141, 1991, pp. 1-9.
- [40] **Egry I., Lohöfer G., Neuhaus P., Sauerland S.:** Surface tension measurements of liquid metals using levitation, microgravity, and image processing. *Int. Journal of Thermophysics*. Vol. 13, No 1, 1992, pp. 65-74.
- [41] **Song B., Springer J.:** Determination of interfacial tension from the profile of a pendant drop using computer-aided image processing: 2. experimental. *Journal of Colloid and Interface Science*. Vol. 184, No 1, 1996, pp. 77-91.
- [42] **Atae-Allah C., Cabrerizo-Vilchez M., Gomez-Lopera J.F., Holgado-Terriza J.A., Roman-Roldan R., Luque-Escamilla P.L.:** Measurement of surface tension and contact angle using entropic edge detection. *Measurement Science and Technology*. Vol. 12, No. 3, 2001, pp. 288-298.
- [43] **Emelyanenko A.M., Boinovich L.B.:** The role of discretization in video image processing next term of sessile and pendant drop profiles. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. Vol. 189, 2001, pp. 197-202.
- [44] **Emelyanenko A.M.:** The application of digital image processing to study surface phenomena. *Progress in Colloid and Polymer Science*. Vol. 128/2004, 2004, pp. 199-201.
- [45] **Zuo Y.Y., Do C., Neumann A.W.:** Automatic measurement of surface tension from noisy images using a component labeling method. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. Vol. 299, 2007, pp 109-116.
- [46] **Staldera A.F., Melchiorb T., Müllerb M., Saged D., Bluc T., Unserd M.:** Low-bond axisymmetric drop shape analysis for surface tension next term and contact angle measurements of sessile drops. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. Vol. 364, 2010, pp. 72-81.
- [47] **Sankowski D., Strzecha K., Jeżewski S., Senkara J., Łobodziński W.:** Computerised device with CCD camera for measurement of surface tension and wetting angle in solid-liquid systems. *Proc. IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conf.*. Venice, 1999, pp. 164-168.

- [48] **Sankowski D., Strzecha K., Jeżewski S.:** Image processing in physical parameters measurement. Proc. 16th IMEKO World Congress. Vienna, 2000, pp. 277-283.
- [49] **Sankowski D., Strzecha K., Jeżewski S.:** Digital image analysis in measurement of surface tension and wettability angle. Proc. IEEE Int. Conf. on Modern Problems in Telecommunication, Computer Science and Engineers Training. Lviv, 2000, pp. 129-130.
- [50] **Sankowski D., Senkara J., Strzecha K., Jeżewski S.:** Automatic investigation of surface phenomena in high temperature solid and liquid contacts. Proc. 18th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conf.. Budapest, 2001, pp. 346-249.
- [51] **Sankowski D., Senkara J., Strzecha K., Jeżewski S.:** Image segmentation algorithms in high temperature measurements of physical properties using CCD camera. Proc. 18th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conf.. Budapest, 2001, pp. 346-249.
- [52] **Strzecha K.:** Zastosowanie przetwarzania i analizy obrazów w wysokotemperaturowych pomiarach własności fizyczno-chemicznych wybranych materiałów. Rozprawa doktorska. Łódź, Politechnika Łódzka, 2002.
- [53] **Jeżewski S.:** Model oświetlenia wysokotemperaturowego w zagadnieniach przetwarzania obrazu próbek na granicy fazy stałej i ciekłej. Rozprawa doktorska. Kraków, Akademia Górniczo-Hutnicza, 2006.
- [54] **Sankowski D., Strzecha K., Janicki M., Koszmider T.:** Thermowet: case - study of control application design. Selected Problems of Computer Science. Warszawa, 2006, pp. 392-401.
- [55] **Strzecha K., Sankowski D., Janicki M., Koszmider T.:** Control application design of Thermo-Wet system. Proc. VIII IMEKO World Congress. Rio de Janeiro, 2006.
- [56] **Fabijańska A.:** Algorytmy poprawy jakości obrazów w wysokotemperaturowych pomiarach właściwości fizykochemicznych wybranych metali i ich stopów. Rozprawa doktorska. Łódź, Politechnika Łódzka, 2007.
- [57] **Koszmider T., Strzecha K.:** New segmentation algorithms of metal's drop images from Thermo-Wet system. Proc. IV IEEE Int. Conf. MEMSTECH'2008. Polyana-Lviv, 2008, pp. 81-83.
- [58] **Strzecha K., Koszmider T.:** Drop shape analysis for measurements of surface tension and wetting angle of metals at high temperatures. Proc. IV IEEE Int. Conf. MEMSTECH'2008. Polyana-Lviv, 2008, pp. 57-59.
- [59] **Koszmider T.:** Zintegrowany system komputerowy do pomiaru cech geometrycznych próbek metali i ich stopów znajdujących się w wysokich temperaturach. Rozprawa doktorska. Łódź, Politechnika Łódzka, 2009.
- [60] **Fabijańska A., Sankowski D.:** Optical filters' influence on digital image quality in high temperature measurements of surface properties. Journal of Applied Computer Science Methods. Vol. 1, No. 2, 2009, pp. 53-63.
- [61] **Fabijańska A., Sankowski D.:** Improvement of image quality of high-temperature vision system. Measurement Science and Technology. Vol. 20, No. 10, 2009, pp. 104018-104027.
- [62] **Fabijańska A., Koszmider T., Strzecha K., Bąkała M.:** Precise edge detection in images of melted specimens of metals and alloys. Proc. 6th Int. Conf. Perspective Technologies and Methods in Mems Design. Polyana-Lviv, 2010, pp. 67-70.

- [63] **Bąkała M.:** Wyznaczanie wybranych parametrów lutowności w wysokich temperaturach z wykorzystaniem metody płytkowej. Rozprawa doktorska. Częstochowa, Politechnika Częstochowska, 2007.
- [64] **Koszmider T., Bąkała M., Fabijańska A., Strzecha K.:** Methods for reduction of thermal effects for analysis of images presenting melted specimens of metals and alloys. Proc. 6th Int. Conf. Perspective Technologies and Methods in Mems Design, Lviv-Polyana, 2010, pp. 35-37.
- [65] **Koszmider T., Bąkała M., Fabijańska A., Strzecha K.:** Experimental comparison of segmentation algorithms on images of heat-emitting objects and methods for their accuracy improvement. Proc. 6th Int. Conf. Perspective Technologies and Methods in Mems Design, Lviv-Polyana, 2010, pp. 38-39.
- [66] **Strzecha K., Bąkała M., Fabijańska A., Koszmider T.:** New ideas in high temperature computerized measurements of surface properties. Proc. 6th Int. Conf. Perspective Technologies and Methods in Mems Design. Lviv-Polyana, 2010, pp. 81-84.
- [67] **Walter K., Bischof H.:** Digital image analysis, selected techniques and applications. Springer, 2001.