

**RAFAŁ WOJCIECHOWSKI**

**MARCIN BĄKAŁA**

**DOMINIK SANKOWSKI**

Wydział Elektrotechniki Automatyki Informatyki i Elektroniki  
Politechniki Łódzkiej

**WYKORZYSTANIE ZAUTOMATYZOWANEGO  
SYSTEMU „TESTER LUTOWNOŚCI”  
DO OKREŚLANIA WYBRANYCH PARAMETRÓW  
Lutowania NA PRZYKŁADZIE  
LUTU BEZOŁOWIOWEGO**

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

Maszynopis dostarczono: 1. 10. 2010

*W artykule omówiono zagadnienia związane z lutownością, która w bezpośredni sposób wpływa na jakość gotowych wyrobów, w których wykorzystywana jest technologia lutowania. Przedstawiono urządzenie do badania parametrów określających lutowność. Urządzenie jest w pełni skomputeryzowane, proces jest sterowany i kontrolowany przy użyciu algorytmów opracowanych i zaimplementowanych poprzez dedykowane oprogramowanie, co zapewnia precyzyjną regulację wszystkich parametrów eksperymentu.*

## 1. WSTĘP

Na podstawie badań przeprowadzonych w ramach Unii Europejskiej stwierdzono, iż każdy jej mieszkaniec w okresie jednego roku generuje około 23 kg odpadów elektronicznych i elektrycznych. Sytuacja ta zmusiła Parlament Europejski do ogłoszenia dwóch dyrektyw:

- RoHS, mówiąca o ograniczonym wykorzystaniu materiałów negatywnie wpływających na środowisko naturalne, do produkcji sprzętu elektrycznego i elektronicznego [1],
- WEEE, regulująca zagospodarowanie zużytych sprzętem elektrycznym i elektronicznym [2].

Podstawą do podjęcia tak radykalnych działań było wyeliminowanie z procesu produkcyjnego ołowiu. W przemyśle elektrotechnicznym i elektronicznym od ponad 50 lat do łączenia elementów za pomocą lutowania wykorzystywane były stopy eutektyczne lub blisko eutektyczne cynowo-ołowiowe. Charakteryzują się one unikalnymi własnościami fizyko-chemicznymi: niską temperaturą topnienia 183 – 1900°C, dostępnością i niską ceną. Niestety ołów, kadm, nikiel znajdują się w grupie tzw. neurotoksyn [3]. Zwłaszcza ołów powoduje trwałe uszkodzenie mózgu, przerywając połączenia pomiędzy neuronami, co skutkuje utratą sprawności myślenia i zmianami w psychice.

W Polsce dyrektywa RoHS obowiązuje na podstawie rozporządzenia ministra gospodarki i pracy z dnia 27.03.2007 r. (Dziennik Ustaw Nr 69, poz. 457). Wprowadzenie dyrektywy spowodowało największe zmiany w procesach produkcyjnych elementów elektronicznych, konieczność zastosowania nowych lutów i zaprojektowania dedykowanych procesów technologicznych w celu uzyskania złączy o określonych własnościach.

Obecnie jednym z głównych nurtów badań naukowych jest poszukiwanie alternatywnych lutów do SnPb. Aktualnie w przemyśle wykorzystywane są stopy: SnAg, SnCu, SnA-gCu. Cechują się one wyższą temperaturą topnienia niż SnPb: Sn<sub>99</sub> Cu<sub>0,7</sub> (227°C), Sn Ag<sub>3</sub> Cu<sub>0,5</sub> (219°C), jak również większą wartością napięcia powierzchniowego, co skutkuje pogorszeniem warunków przeprowadzenia procesu technologicznego lutowania [8, 11].

Drugim nurtem badań naukowych w kontekście dyrektywy RoSH jest poszukiwanie nowych, zautomatyzowanych metod pomiarowych lutowności i napięcia powierzchniowego [5, 6]. Uzyskanie wyników ilościowych, daje możliwość porównania własności fizyko-chemicznych badanych lutów, jak również sprawdzenia oddziaływania międzyfazowego badanego układu. W odpowiedzi na zapotrzebowanie w zakresie opracowania zautomatyzowanego systemu do ilościowego wyznaczania parametrów lutowności i napięcia powierzchniowego ciekłych metali, zaprojektowano stanowisko badawcze Tester lutowności [7, 8, 9]. Powstało ono w ramach projektu badawczego KBN nr 4

T10C 040 22 realizowanego w Katedrze Informatyki Stosowanej PŁ w latach 2002 – 2004. nt.: „Model automatycznego testera pomiaru lutowności lutów twardych dla zastosowań przemysłowych” [4]. Badania nad lutownością są kontynuowane w ramach obecnie realizowanego grantu KBN nr 4418/B/T02/2010/39 nt.: „Zintegrowana platforma do automatycznego pomiaru zwilżalności i napięcia powierzchniowego lutów w wysokich temperaturach”.

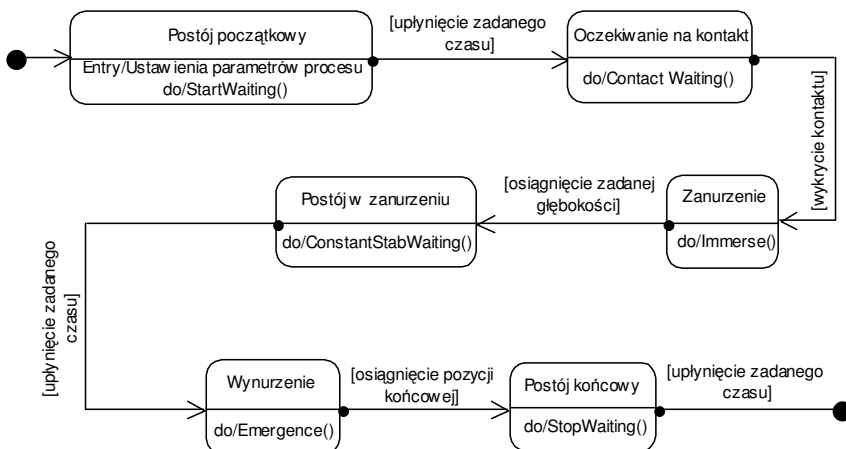
## 2. URZĄDZENIE POMIAROWE

### 2.1. Metody pomiarowe zaimplementowane na testerze lutowności

Na urządzeniu testowym możliwe jest przeprowadzenie eksperymentów umożliwiających wyznaczenie własności fizyko-chemicznych: lutowności (eksperyment zanurzeniowy) oraz napięcia powierzchniowego lutu (eksperyment bąbelkowy).

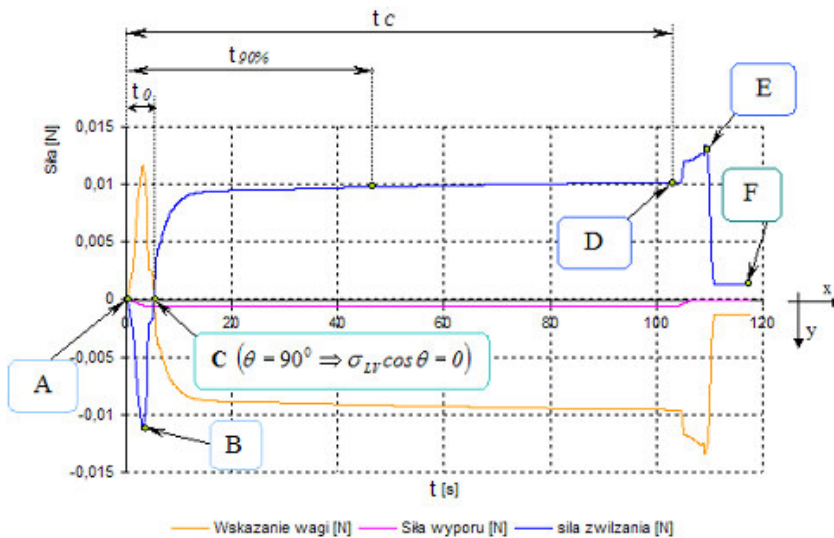
### 2.2. Wyznaczanie lutowności

Diagram stanów eksperymentu zanurzeniowego przedstawiono na rys. 1. Rzeczywisty proces eksperymentu zanurzeniowego rejestrowany przez urządzenie został przedstawiony na wykresach na rys. 2.



Rys. 1. Diagram stanów eksperymentu zanurzeniowego

Wykres zależności siły zwilżania od czasu w cyklu zanurzenia - wynurzenia próbki przedstawiono na rys. 2. W punkcie A w czasie  $t=0$  [s] ma miejsce zetknięcie powierzchni czołowej próbki z lutem. Początkowa ujemna wartość siły zwilżania wynika ze zmiany wartości kąta zwilżania  $\theta$  i wartości siły wyporu. Na prezentowanej charakterystyce w punkcie B, kąt zwilżania  $\theta$  osiąga wartość maksymalną, a zatem siła zwilżania  $F$  – wartość minimalną. Punkt C odpowiada wartości kąta zwilżania  $\theta=90^\circ$ ,  $\sigma_{LV}\cos\theta=0$ . Odpowiada to chwili, gdy  $t=t_0$ . Wartość siły zwilżania osiągnięta w punkcie D odpowiada wartości granicznej kąta zwilżania  $\theta$  dla badanego układu dla  $t=t_c$ . Dodatkowy parametr to  $t_{90\%}$ , który odzwierciedla wymagany okres czasu do osiągnięcia przez siłę zwilżania  $F_k$  90% wartości granicznej określonej w punkcie D. Etap zawarty pomiędzy punktami D – E, odzwierciedla wynurzenie próbki i wyciąganie menisku połączonego z powierzchnią czołową próbki ponad powierzchnię lustra lutowia. W punkcie E następuje zerwanie menisku cieczy i obserwowany jest spadek wartości sił zwilżania. W punkcie F następuje koniec eksperymentu.



Rys. 2. Wykres zależności siły zwilżania od czasu w cyklu zanurzenia – postoju – wynurzenia próbki z zaznaczonymi punktami charakterystycznymi

W trakcie przeprowadzania szeregu eksperymentów z różnego rodzaju lutami uzyskano kilka przebiegów charakterystyk zwilżalnościowych. Ich kształt zależy od szeregu parametrów, takich jak: rodzaj i skład lutu, temperatura eksperymentu, sposób przygotowania podłoża, itp. Istotę zjawiska zwilżania można opisać za pomocą kilku kryteriów jakościowych, które wyznaczone zostały na podstawie krzywych zwilżania z rys. 2. Do najważniejszych kryteriów

zalicza się dwie wielkości: maksymalna graniczna wartość siły zwilżania osiągnięta w punkcie D, czas zwilżania (tj. czas potrzebny do uzyskania dodatniej wartości siły zwilżania  $t_0$ ).

Wyższa wartość siły zwilżania oraz krótszy czas zwilżania, wpływają na poprawę zwilżalności. Opisywane parametry nie są wszakże jedynymi, które można oszacować z przebiegu charakterystyki siły zwilżania w funkcji czasu. Również kształt krzywej zwilżania jest bardzo istotny. Krzywa ta opisywana jest przez dwa parametry: czas potrzebny do osiągnięcia 90% granicznej wartości siły zwilżania ( $t_{90\%}$ ), przez stosunek czasu ( $t_{90\%}$ ) do czasu trwania testu ( $t_C$ ). Mała wartość ilorazu czasu  $t_{90\%}$  i  $t_C$  oznacza, że krzywa przyjmuje kształt „prostokątny”, tj. krzywa gwałtownie rośnie do osiągnięcia maksymalnej granicznej wartości siły zwilżania. Im mniejsza wartość opisywanego powyżej ilorazu ( $t_{90\%}$  i  $t_C$ ), tym lepsze warunki zwilżania, powoduje to możliwość zredukowania czasu zwilżania bez konieczności znaczącego zmniejszania wartości siły zwilżania. Wartość stosunku  $t_{90\%}$  i  $t_C$  mniejsza niż 0,5 oznacza, że 90% maksymalnej siły zwilżania  $F_k$  może być osiągnięte w czasie o połowę krótszym od wyznaczonego  $t_C$ . Graniczna siła zwilżania podzielona przez różnicę między  $t_{90\%}$  a  $t_0$  jest także bardzo istotna w opisie zjawiska zwilżania. Dowolna wartość większa niż 0,01 wskazuje na nagłe zwilżanie, przy założeniu dużej wartości siły zwilżania. Wartości mniejsze niż 0,01 oznaczają bardzo powolne zwilżanie, oraz zakładaną małą wartość siły zwilżania.

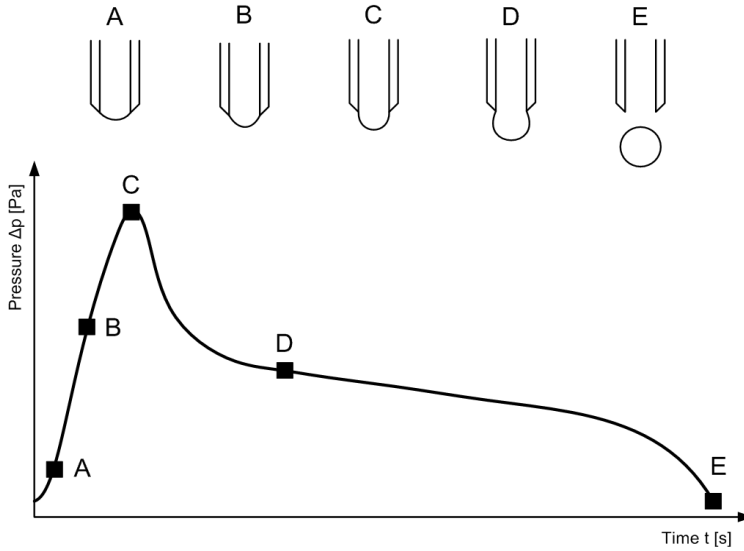
### 2.3. Wyznaczanie napięcia powierzchniowego ciekłego lutu

Metody określania wartości napięcia powierzchniowego ciekłych lutów zaimplementowane na Testerze lutowności:

- metoda maksymalnego ciśnienia w pęcherzyku,
- metoda płytkowa.

Eksperyment bąbelkowy przeznaczony jest do pomiaru napięcia powierzchniowego. W tym eksperymencie zamiast próbki na uchwycie wagi umieszczana jest ceramiczna kapilara. Próba rozpoczyna się zanurzeniem na zadaną głębokość. Proces formowania się pęcherzyka gazowego przedstawiony jest na rys. 3 [10]. Odcinek A – B odpowiada narostowi rejestrowanego ciśnienia wewnątrz kapilary. Kształt uformowanego pęcherzyka gazowego na końcu kapilary i wielkość rejestrowanego ciśnienia wewnątrz kapilary zależy od kształtu i zwilżalności materiału kapilary. W punkcie C, ciśnienie osiąga maksymalną wartość, w tym samym czasie pęcherzyk ma półokrągły kształt, którego promień jest równy promieniowi geometrycznemu kapilary. Na odcinku D, E rejestrowane jest obniżenie ciśnienia. W punkcie E następuje oderwanie

pęcherzyka od powierzchni czołowej kapilary i powtórzenie cyklu. Rys. 4 prezentuje diagram stanów eksperymentu bąbelkowego.

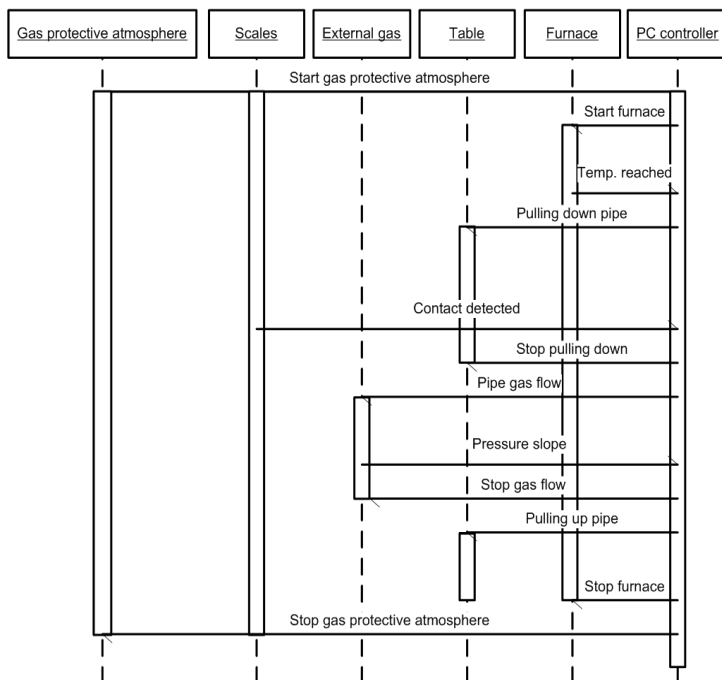


Rys. 3. Charakterystyka narostu ciśnienia i proces formowania się pęcherzyka gazowego

Napięcie powierzchniowe wyrażone jest wzorem:

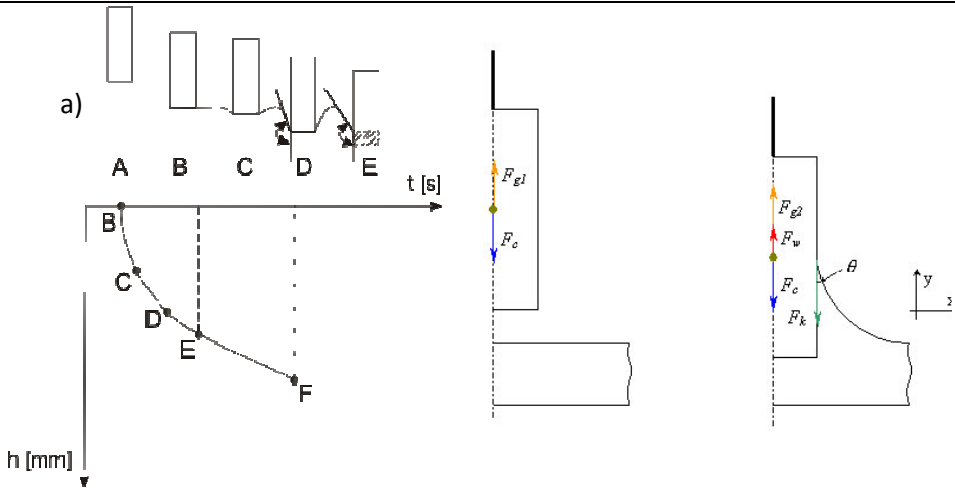
$$\sigma = 0.5 \cdot r \cdot p_g - \rho g h_d \quad (1)$$

gdzie:  $r$  – promień kapilary,  $p_g$  – ciśnienie gazu,  $\rho$  – gęstość ciekłego metalu,  $g$  – przyspieszenie ziemskie,  $h_d$  – głębokość zanurzenia kapilary.



Rys. 4. Diagram stanów eksperymentu bąbelkowego

W metodzie płytkowej do wyznaczenia napięcia powierzchniowego ciekłego lutu wykorzystuje się płytkę wykonaną z materiału niezwilżanego przez lut. Wartość rejestrowanej siły działającej na płytkę jest zależna od głębokości zanurzenia próbki w lutu, obwodu oraz napięcia powierzchniowego (rys. 5). W punkcie B następuje kontakt próbki z ciekłym lutem. W obszarze pomiędzy punktami B, C, D następuje zmiana kąta zwilżania od 0 do wartości bliskiej  $180^\circ$ . Po przekroczeniu krytycznej wartości zanurzenia E (poziom równy napięciu powierzchniowemu) siła działająca na próbkę jest wprost proporcjonalna do głębokości zanurzenia. Punkt E, gdzie obserwowane jest przejście wykresu w linię prostą (punkt przegięcia) jest szukaną wartością napięcia powierzchniowego lutu. W punkcie F następuje koniec etapu pogrążania próbki w ciekłym lutu.



Rys. 5. a) Zanurzenie próbki w ciekłym lucie (brak zwilżania), b) rozkład sił działających na pionową płytkę (zwilżanie powierzchni)

Do wyznaczenia napięcia powierzchniowego i międzyfazowego wykorzystano przypadek, dla którego suma rzutów wszystkich działających sił na oś OY wynosi:

$$\sum_{i=1}^{i=n} F_{iy} = F_{g2} + F_w - F_c - F_k = 0 \quad (2)$$

gdzie: siła rejestrowana przez układ mierzący przed zanurzeniem, skierowana w górę:  $F_{g1}$ , siła grawitacji, skierowana w dół:  $F_c$ ,  $F_{g2}$  siła rejestrowana przez układ mierzący po zanurzeniu, skierowana w górę:  $F_{g2}$ , przy czym  $F_{g2} > F_{g1}$ ,  $F_w$  siła wyporu skierowana w górę,  $F_k$  siła kapilarna zwilżania.

Znajomość wartości napięcia adhezyjnego  $F_k$  i kąta zwilżania  $\theta=180^\circ$  (zastosowany materiał  $Al_2O_3$  charakteryzuje się brakiem zwilżalności przez większość ciekłych metali) umożliwia wyznaczenie napięcia powierzchniowego ciekłego lutu.

$$F_k = O_p \sigma_{LV} \cos \theta \quad (3)$$

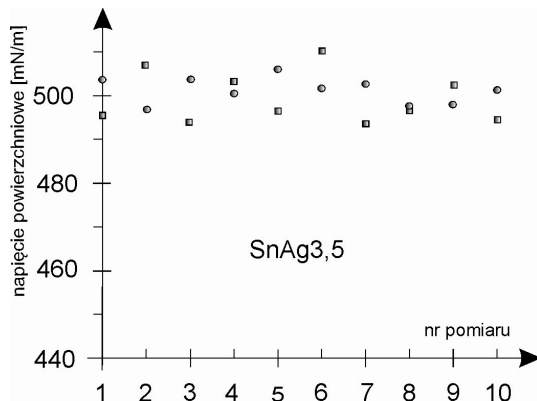
gdzie:  $O_p$  – obwód próbki,  $\sigma_{LV}$  – napięcie powierzchniowe cieczy na granicy ciecz – gaz,  $\theta$  – kąt zwilżania.

Pomiary napięcia powierzchniowego lutu SnAg3:



- wyniki pomiarów metodą maksymalnego ciśnienia w pęcherzyku ( $\circ$ ),
- wyniki pomiarów metodą płytkową ( $\square$ ).

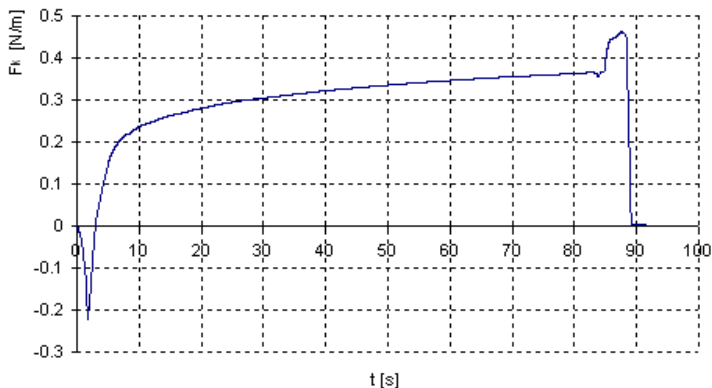
Rys. 6 prezentuje wyniki pomiarów napięcia powierzchniowego lutu SnAg3,5 w stałej temperaturze 250°C. Wartość napięcia powierzchniowego lutu bezołowiowego SnAg3,5 wynosi  $\sigma_{LV}=504$  [mN/m].



Rys. 6. Wartość napięcia powierzchniowego w stałej temperaturze  $T=250^{\circ}\text{C}$  dla lutu SnAg3,5

### 3. BADANIA NA LUCIE SN – 3,5 AG

Przebieg siły zwilżania w funkcji czasu dla lutu Sn3,5 Ag w temperaturze 250°C przedstawiono na rys. 7.



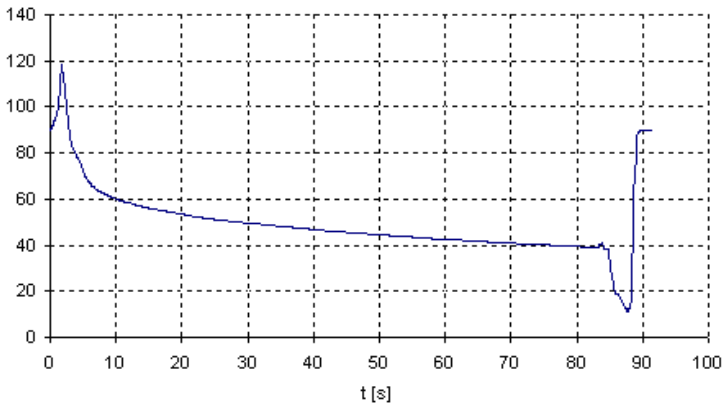
Rys. 7. Przebieg siły zwilżania w funkcji czasu dla lutu Sn –Ag 3,5.

Parametry przedstawione w tabeli 1 charakteryzują proces kinematyki zwilżania podłoża. Wartość ilorazu  $t_{90\%}$  oraz  $t_C$  wynosząca 0,6284 odzwierciedla „łagodnie” narastającą charakterystykę wartości siły zwilżania, aż do osiągnięcia wartości granicznej  $F_G=0,351$  [N/m].

Tabela 1. Wykaz przedmiotów na studiach podyplomowych Efektywne Wykorzystanie Zasobów Informatycznych i Informatyka w Praktyce

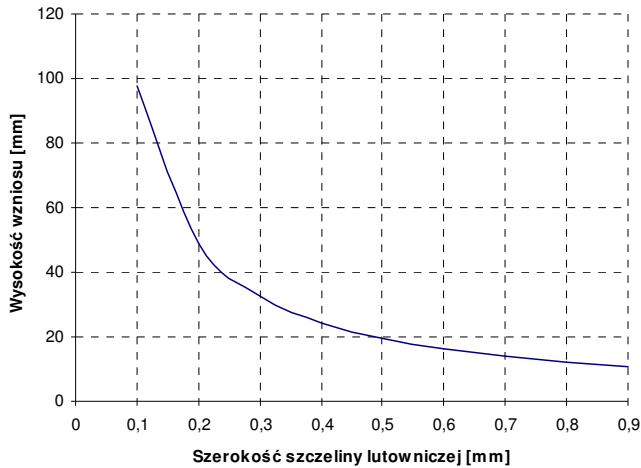
$T_0$	3,64 [s]
$t_{90\%}$	52,937 [s]
$t_C$	84,23 [s]
$F_G$	0,351 [N/m]
$t_{90\%} / t_C$	0,6284
$t_{90\%}-t_0$	49,297 [s]
$F_G / (t_{90\%}-t_0)$	0,0713

W oparciu o wartości siły zwilżania  $F_k$  w funkcji czasu z rys. 7 i napięcia powierzchniowego  $\sigma_{LV}=0,504$  [N/m] (wyznaczono charakterystykę kąta zwilżania w funkcji czasu, rys. 11). Ustalono, iż po czasie 80s wartość graniczna kąta zwilżania wynosi  $\theta_0=40^\circ$ .



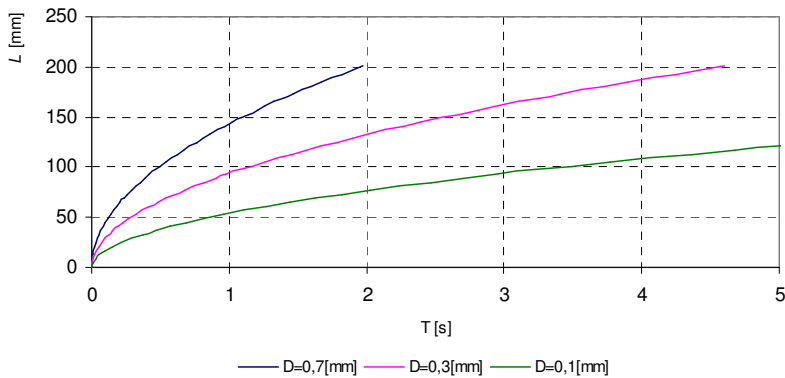
Rys. 8. Charakterystyka kąta zwilżania w funkcji czasu dla lutu Sn – 3,5 Ag

Na podstawie granicznej wartości siły zwilżania  $F_k=0,351$  [N/m] obliczono podstawowe parametry lutowności. Obliczona charakterystyka wysokości wzniosu w układzie dwóch równoległych płytek została przedstawiona na rys. 9.



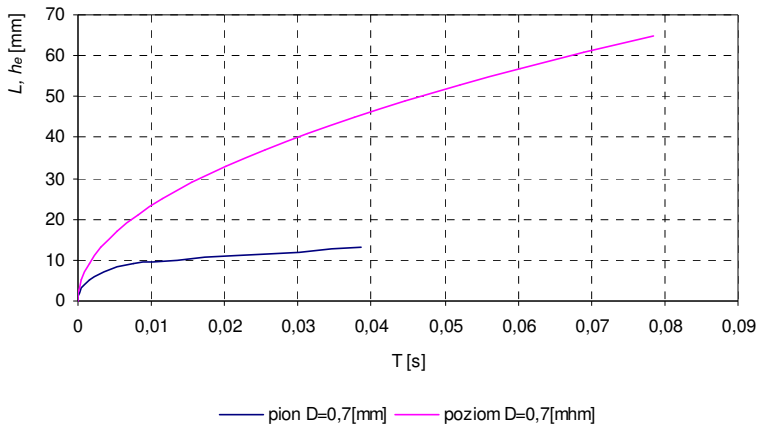
Rys. 9. Wysokości wzniosu w układzie z równoległymi płytkami dla  $F_k=0,351$  [N/m]

Długość wpłynięcia lutu dla granicznej wartości  $F_k$  dla kilku szczelin lutowniczych ( $D=0,7$ ;  $D=0,3$ ;  $D=0,1$  [mm]) prezentuje rys. 10.



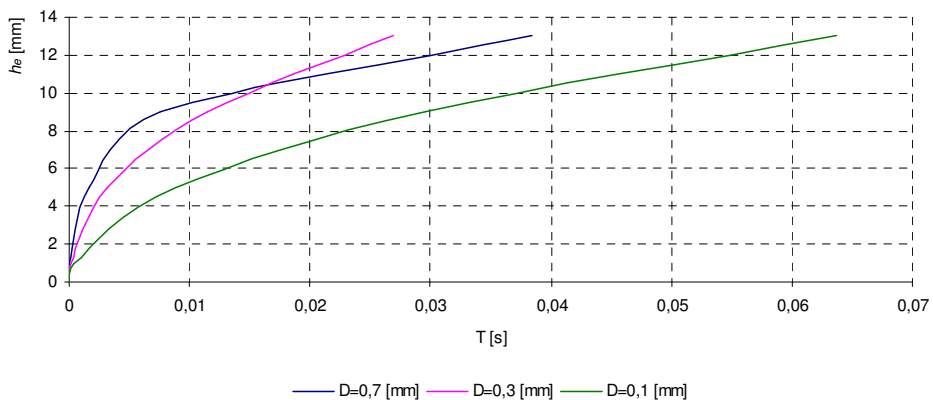
Rys. 10. Charakterystyki długości wpłynięcia lutu Sn3,5Ag dla różnych wielkości szczelin lutowniczych

Kolejnymi parametrami lutowności przedstawionymi na rys. 11 dla szczeliny lutowniczej  $D=0,7$  [mm], wyznaczonymi na podstawie granicznej wartości siły zwilżania  $F_k$  są czas wypełnienia szczeliny pionowej  $t_H$  oraz czas wypełnienia szczeliny poziomej  $t_V$ .



Rys. 11. Długość i wysokość wpłynięcia lutu Sn3,5 Ag w szczelinę 0,7 [mm] utworzoną z dwóch równoległych płytek miedzianych

Na poniższym wykresie (rys. 12) w oparciu o graniczną wartość siły zwilżania  $F_k$  wyznaczono charakterystyki wzniosu dla kilku szczelin lutowniczych ( $D=0,7$ ;  $D=0,3$ ;  $D=0,1$  [mm]).



Rys. 12. Charakterystyki wysokości wzniosu lutu L-Ag5P dla różnych wielkości szczelin lutowniczych

#### 4. WNIOSKI

Wykonane eksperymenty udowodniły, że zaimplementowana w systemie testera lutowności metoda płytkowa może być wykorzystywana do badań

parametrów określających lutowność. Urządzenie jest w pełni skomputeryzowane, proces jest sterowany i kontrolowany przy użyciu algorytmów zaimplementowanych poprzez dedykowane oprogramowanie, co zapewnia precyzyjną regulację wszystkich parametrów eksperymentu. Projektowanie eksperymentów odbywa się w oparciu o predefiniowane szablony, co znacząco skraca okres przygotowania doświadczeń. Przyjazność aplikacji oraz możliwość wizualizacji wyników na wykresach i w tabelach w czasie rzeczywistym ułatwia pracę z systemem i interpretację uzyskanych wyników. W pełni zautomatyzowany system analizujący dostarcza wyników ilościowych. Archiwizacja danych odbywa się w oparciu o serwer baz danych, co umożliwia porównywanie uzyskanych wyników przy różnych parametrach eksperymentu i dla różnych zestawów badanych materiałów. Dodatkowo możliwe jest przeprowadzanie badań w szerokim zakresie temperatur (do 1000°C), w obecności gazowej atmosfery ochronnej bądź redukcyjnej. Integracja kilku metod pomiarowych na jednym stanowisku z zastosowaniem nowoczesnych, precyzyjnych algorytmów pomiarowo – obliczeniowych umożliwia uzyskanie wzorcowych wyników pomiarów. Zaletą otrzymanych w ten sposób wyników pomiarów i obliczeń jest ich powtarzalność, wynikająca z pełnej automatyzacji systemu pomiarowego. Wyznaczone parametry umożliwiają dobór lutu dla danego materiału lutowanego, topnika lub atmosfery ochronnej dla danego zestawu materiałów lutowanych – lut. Przeprowadzone badania wskazują, że metoda płytkowa jest odpowiednia do wyznaczania i optymalizacji parametrów lutowania w danym układzie lut – materiał podłoża. Celowe jest zatem poszukiwanie nowych form automatyzacji pomiaru lutowności zapewniającego uzyskanie wyników ilościowych.

## LITERATURA

- [1] Directive 2002/95/EC of the European Parliament and of the Council of 27 January 2003 on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment (RoHS), Official Journal of the European Union, L37/19, 13.02.2003.
- [2] Directive 2002/96/EC of the European Parliament and of the Council of 27 January 2003 on the waste electrical and electronic equipment (WEEE), Official Journal of the European Union, L37/24, 13.02.2003.
- [3] **Jakubowski M.:** Ołów i jego związki nieorganiczne, Podstawy i Metody Oceny Środowiska Pracy, Zeszyt 21, Warszawa, 1999.
- [4] **Sankowski D. i in.:** Projekt badawczy KBN nr 4 T10C 040 22: Model automatycznego testera pomiaru lutowności lutów twardych dla zastosowań przemysłowych. Raport końcowy.
- [5] R.J. Klein Wassink., „Soldering In Eletronics”, 2 nd End. Electrochem. Pub. Ltd. Szkocja 1989.

- [6] **Miyazaki M., Mizutani M., Takemoto T., Mastunawa A.:** Measurement of Surface Tension with Wetting Balance, Q. Japan, Weld. Soc. Nr 15/1997, str. 681-687.
- [7] **Missol W.:** Energia powierzchni rozdziału faz w metalach, Wyd. Śląsk, Katowice 1974.
- [8] **Moser Z., Gašior W., Struś J.:** Surfacetension measurement of the eutectic alloy, Journal of Electornic Materials, t. 1, nr 11/2002, str. 1225-1229.
- [9] **Morawska Z., Bukat, B., Pieńkowska B.:** Metody badań stopów lutowniczych, Elektronika 4/96, str. 7-10.

## **APPLICATION OF AUTOMATED SOLDERABILITY TESTER FOR DETERMINING OF SELECTED PARAMETERS OF LEAD-FREE SOLDERS**

### **Abstract**

The article discusses the solderability, which directly affects the quality of products, in which soldering technology is used. Knowledge of the value of selected solderability parameters determines the production process that affects its speed and efficiency, thereby reducing costs. The ban introduced by the European Union on the use of solders with the addition of lead, entails the development of new solders and solderability measurement systems to ensure obtaining quantitative results.

Politechnika Łódzka  
Katedra Informatyki Stosowanej