

NIKOŃCZUK Piotr<sup>1</sup>  
DOBRZYŃSKA Renata<sup>2</sup>

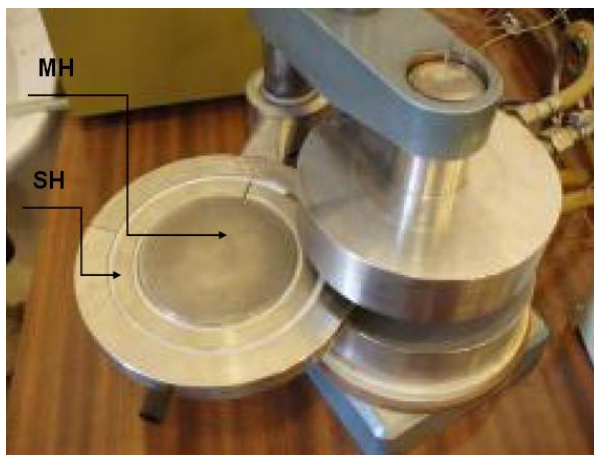
## Metodyka pomiaru przewodności cieplnej osadów lakierów

### WPROWADZENIE

W trakcie lakierowania wewnątrz kabiny lakierniczej następuje proces ciągłej wymiany powietrza. Wymiana powietrza ma za zadanie usunięcie z wnętrza kabiny lakierniczej powstałej mgły lakierniczej oraz zapobieganie powstawaniu mieszanki wybuchowej. Krotność wymian w kabinach lakierniczych znajduje się w przedziale 300-400 objętości na godzinę [n/h]. Dla zapewnienia właściwych warunków pracy temperatura wewnątrz kabiny lakierniczej utrzymywana jest na poziomie temperatury pokojowej. Przy tak dużej wymianie powietrza istnieje zasadność stosowania rekuperatorów do odzysku ciepła odpadowego do ogrzewania świeżego powietrza pobieranego z zewnątrz. Zazwyczaj stosuje się rekuperatory krzyżowe. Odciągane z wnętrza kabiny lakierniczej powietrze jest oczyszczane z cząstek stałych lakierów poprzez filtry typu „paint stop”. Jednak żaden filtr nie jest w stanie zapewnić całkowitego oczyszczenia powietrza z cząstek lakieru [2,3,11]. Nie zapobiega to w pełni powstawaniu osadów lakieru w kanałach wyrzutni kabiny lakierniczej. Problem powstawania osadów dotyczy również ścianek rekuperatora [6,7,8]. Powstający osad wewnątrz rekuperatora stanowi opór dla wymiany ciepła. Wraz ze wzrostem grubości osadu obniża się sprawność odzysku ciepła [9]. Do tej pory nie napotkano wyników pomiarów przewodności cieplnej osadów lakierów, a jedynie pomiary przewodności powłok [1,4,5]. Obecnie prowadzone są badania dotyczące tempa wzrostu osadów lakierów wewnątrz rekuperatorów oraz prędkości spadku sprawności odzysku ciepła w kabinach lakierniczych. Jednym z elementów badań jest pomiar przewodności cieplnej osadów lakierów. Ze względu na zróżnicowane struktury i grubości regularnych powłok lakierniczych oraz osadów lakierów, można spodziewać się różnych przewodności cieplnych tych pokryć.

### 1 METODYKA POMIARÓW

Istnieje wiele metod pomiaru przewodności cieplnej [1,4,5]. Przewodność cieplną  $\lambda$  można wyznaczyć przy użyciu lambdomierza. Głowica pomiarowa lambdomierza składa się z grzejnika głównego MH otoczonego grzejnikiem ekranującym SH (rys.1).



Rys. 1 Schemat głowicy pomiarowej lambdomierza; MH – grzejnik główny, SH – grzejnik ekranujący

<sup>1</sup> Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Techniki Morskiej i Transportu, Katedra Klimatyzacji i Transportu Chłodniczego A. Piatów 41, 71-065 Szczecin, e-mail: piotr.nikonczuk@zut.edu.pl

<sup>2</sup> Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Techniki Morskiej i Transportu, Katedra Inżynierii Bezpieczeństwa i Energetyki, Al. Piatów 41, 71-065 Szczecin, e-mail: Renata.dobrzynska@zut.edu.pl

Grzejniki oddzielone są izolacją termiczną. Skuteczność ekranowania grzejnika głównego przez grzejnik ekranujący zależy od temperatur bocznych powierzchni grzejników (rys.1). Układ jest zrównoważony gdy temperatury bocznych powierzchni grzejników są równe i nie ma przepływu ciepła między ściankami bocznymi wymienionych grzejników. Odpowiada to warunkowi przepływu ciepła z grzejnika głównego tylko w kierunku powierzchni próbek badanego materiału. Ciepło przewodzone przez próbki odbierane jest przez chłodnice chłodzone przez termostat. Specjalny układ mechaniczny zamontowany na kolumnie nośnej lambdomierza zapewnia właściwy docisk chłodnic do powierzchni próbek badanego materiału.

Przed umieszczeniem próbek w głowicy lambdomierza należy zmierzyć ich grubość. Następnie za pomocą potencjometru ustawia się napięcie zasilania grzejnika głównego. W trakcie stabilizacji termicznej układu pomiarowego, takie napięcie zasilania grzejnika ekranującego, aby temperatury grzejnika głównego i ekranującego wyrównały się. Woltomierz włączony pomiędzy termopary grzejnika głównego i ekranującego powinien wskazywać '0'. Pozwala to na spełnienie warunków równowagi termicznej (stanu ustalonego). Po uzyskaniu równowagi termicznej układu pomiarowego napięcie zasilania  $U$  i prąd  $I$  płynący przez grzejnik główny określają moc pobieraną przez grzejnik główny. Moc pobierana przez grzejnik główny jest równoważna strumieniowi ciepła  $q$ , przepływającemu przez próbki pomiarowe o powierzchni  $F$ :

$$q * F = U * I [W] \quad (1)$$

Wielkość strumienia ciepła jest uzależniona od przewodności cieplnej próbek, różnicy temperatur oraz grubości próbek:

$$q = \frac{\lambda}{d} \Delta T \left[ \frac{W}{m^2} \right] \quad (2)$$

gdzie:

$\Delta T$  – różnica temperatur po obu stronach próbki,

$d$  - średnia grubość próbki,

$\lambda$  - przewodność cieplna próbki [ $W/m^{\circ}C$ ],

Na podstawie powyższych równań i uzyskanych wyników pomiarów można obliczyć przewodność cieplną próbek pomiarowych.

$$\lambda = \frac{U * I * d}{2 * F * \left( \frac{(T_3 - T_1) + (T_4 - T_2)}{2} \right)} \left[ \frac{W}{m^{\circ}C} \right] \quad (3)$$

gdzie:

$\lambda$  - współczynnik przewodnictwa cieplnego [ $W/m^{\circ}C$ ]

$U$  - napięcie zasilania grzejnika głównego, [V]

$I$  - natężenie prądu przepływającego przez grzejnik główny [A],

$d$  - średnia grubość próbek [m],

$F$  - powierzchnia czynna próbki [ $m^2$ ],

$T_1$  - temperatura chłodnicy górnej [ $^{\circ}C$ ],

$T_2$  - temperatura chłodnicy dolnej [ $^{\circ}C$ ],

$T_3$  - temperatura górnej powierzchni grzejnika głównego [ $^{\circ}C$ ],

$T_4$  - temperatura dolnej powierzchni grzejnika głównego [ $^{\circ}C$ ],

$\Delta T$  - średnia różnica temperatur pomiędzy powierzchnią grzejnika i chłodnicą [ $^{\circ}C$ ].

Średnia grubość próbki jest równa średniej arytmetycznej próbki górnej i dolnej:

$$d = \frac{(d_1 + d_2)}{2} \quad (4)$$

Powierzchnia czynna próbki równa jest łącznej powierzchni czynnej grzejnika głównego. W używanym stanowisku średnica grzejnika głównego wynosi  $D=0,1m$ .

$$F = F_1 = F_2 = \frac{\pi D^2}{4} \quad (5)$$

Ostatecznie przewodność cieplną można obliczyć z zależności:

$$\lambda = \frac{2 * U * I * (d_1 + d_2)}{\pi * D^2 * (T_3 + T_4 - T_1 - T_2)} \quad (6)$$

gdzie:

$D$  – średnica grzejnika głównego,

$d_1$  - grubość próbki górnej,

$d_2$  - grubość próbki dolnej.

Obliczone ze wzoru wartości  $\lambda$ , odniesione są do średniej temperatury pomiaru:

$$T_{\text{sr}} = \frac{T_1 + T_2 + T_3 + T_4}{4} \quad (7)$$

## 2 POMIAR GRUBOŚCI PRÓBEK OSADU LAKIERU

Pomiaru grubości próbek należało dokonać metodą nieniszczącą aby wykorzystać je do pomiaru przewodności cieplnej. Dlatego wykonano pomiarów grubości próbek tylko na ich obwodach. Pomiary wykonano suwmiarką elektroniczną. Na rysunku 2 przedstawiono przykładową próbkę osadów lakierów.



Rys. 2 Przykładowa próbka osadów lakierów

Jako wynik pomiaru dla każdej próbki przyjmuje się wartość średniej arytmetycznej:

$$\bar{d} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i \quad (8)$$

Błąd pomiarowy określono według zależności:

$$\delta d = \sqrt{\delta d_L^2 + \frac{1}{3} \delta d_S^2} \quad (9)$$

Przy czym, błąd systematyczny  $\delta d_S$  jest równy dokładności przyrządu pomiarowego. Ze względu na ilość pomiarów powyżej 10 wartości błędów pojedynczych pomiarów są zbliżone do rozkładu Gaussa i błąd losowy  $\delta d_L$  będzie równoważny z odchyleniem standardowym wartości średniej:

$$\delta d_L = S_{\bar{d}} = \frac{S_d}{\sqrt{n}} \quad (10)$$

Natomiast odchylenie standardowe pojedynczego pomiaru wynosi:

$$S_d = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2} \quad (11)$$

### 3 POMIAR PRZEWODNOŚCI CIEPLNEJ

Próbki pomiarowe osadów lakieru umieszcza się w głowicy pomiarowej lambdomierza, pomiędzy grzejnikiem i elementami chłodzącymi. Próbki powinny być ściśnięte aby zapewnić odpowiedni kontakt z zarówno grzejnikiem jak i odbiornikami ciepła. Ze względu na znaczną kruchość próbek stosuje się niewielkie podkładowe dystansowe z tworzywa sztucznego. Grubości podkładek dystansowych są równe wartościom średnich arytmetycznych każdej z próbek. Aby zapobiec wpływowi podkładek dystansowych na wyki pomiarów, podkładowe dystansowe umieszcza się w rejonie grzejnika ekranującego. Można uznać, że takie umieszczenie podkładek dystansowych nie wpływa na wyniki pomiarów przewodności cieplnej próbek osadów. Umieszczenie próbek przedstawia rysunek 3.



Rys. 3 Próbki umieszczone w głowicy pomiarowej lambdomierza.

W stanie ustalonym dokonuje się pomiarów napięcia i prądu zasilania grzałki głównej. Błędy pomiarowe systematyczne napięcia i prądu wynikają z dokładności przyrządów pomiarowych (multimetrów).

Pomiary przeprowadza się dla minimum trzech różnych temperatur grzejnika głównego. Wyniki pomiarów dotyczą stanów ustalonych, to znaczy takich że temperatury grzejnika głównego oraz ekranującego są jednakowe. Błędy pomiarowe wynikają również z klas przyrządów pomiarowych.

Dla każdego eksperymentu błąd pomiarowy wynikający z propagacji błędów w pomiarach pośrednich oblicza się z następującej zależności:

$$\delta\lambda = \sqrt{\left(\frac{\partial\lambda}{\partial U}\delta U\right)^2 + \left(\frac{\partial\lambda}{\partial I}\delta I\right)^2 + \left(\frac{\partial\lambda}{\partial d_1}\delta d_1\right)^2 + \left(\frac{\partial\lambda}{\partial d_2}\delta d_2\right)^2 + \sum_{i=1}^4 \left(\frac{\partial\lambda}{\partial T_i}\delta T_i\right)^2} \quad (12)$$

Poszczególne pochodne cząstkowe przyjmują następujące postaci:

$$\frac{\partial\lambda}{\partial U} = \frac{2 * I * (d_1 + d_2)}{\pi * D^2 * (T_3 + T_4 - T_1 - T_2)} \quad (13)$$

$$\frac{\partial\lambda}{\partial I} = \frac{2 * U * (d_1 + d_2)}{\pi * D^2 * (T_3 + T_4 - T_1 - T_2)} \quad (14)$$

$$\frac{\partial\lambda}{\partial d_1} = \frac{2 * U * I}{\pi * D^2 * (T_3 + T_4 - T_1 - T_2)} \quad (15)$$

$$\frac{\partial\lambda}{\partial d_2} = \frac{2 * U * I}{\pi * D^2 * (T_3 + T_4 - T_1 - T_2)} \quad (16)$$

$$\frac{\partial\lambda}{\partial T_1} = \frac{\partial\lambda}{\partial T_2} = \frac{\partial\lambda}{\partial T_3} = \frac{\partial\lambda}{\partial T_4} = \frac{2 * U * I * (d_1 + d_2)}{\pi * d^2 * (T_3 + T_4 - T_1 - T_2)^2} \quad (17)$$

Ostateczny wynik badań przewodności cieplnej osadów lakierów oblicza się jako średnią ważoną według równania

$$\bar{\lambda}_w = \frac{\sum_{i=1}^3 \frac{\lambda_i}{(\delta\lambda_i)^2}}{\sum_{i=1}^3 \frac{1}{(\delta\lambda_i)^2}} \quad (18)$$

Natomiast wynik końcowy z uwzględnieniem propagacji błędów będzie miał następującą postać

$$\lambda = \bar{\lambda}_w \mp \text{Max}\{S_{int}, S_{ext}\} \quad (19)$$

gdzie

$$S_{int} = \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^3 \frac{1}{\delta\lambda_i^2}}} \quad (20)$$

$$S_{ext} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^3 \left[ \frac{(\lambda_i - \bar{\lambda}_w)^2}{\delta\lambda_i^2} \right]}{2 \sum_{i=1}^3 \left( \frac{1}{\delta\lambda_i^2} \right)}} \quad (21)$$



## PODSUMOWANIE

Przedstawiona w artykule metodyka pomiarów przewodności cieplnej osadów lakierów opiera się o lambdomierz, którym autorzy dysponują. Wyniki pomiarów wykonanych przedstawioną metodyką prowadziły do uzyskania orientacyjnych wartości przewodności cieplnej osadów. Przedstawiony lambdomierz stosuje się zazwyczaj do pomiarów przewodności cieplnej materiałów, których próbki mają grubość jednolitą na całej powierzchni oraz można poddawać ścisaniu. Jak wspomniano osady lakierów są materiałem kruchym oraz ich grubość jest bardzo zróżnicowana, i jest bardzo trudno uzyskać próbkę o jednolitej grubości. Dlatego na podstawie pomiarów grubości na obwodzie próbki wyznacza się jej wartość średnią. Następnie dobiera się podkładki dystansowe o grubości równej wartości średniej wyników pomiarów. Podkładki dystansowe zapobiegają zgnieceniu próbek w głowicy lambdomierza. Wartość średnia jest traktowana w obliczeniach jako grubość próbki. Podejście takie obciąża wyniki pomiarów przewodności cieplnej, jednak jak wspomniano wyniki te wykorzystywane są przede wszystkim do określenia skali problemu sformułowanego we wstępie.

Planuje się budowę stanowiska pomiarowego do dalszych badań. Koncepcja stanowiska opiera się wykorzystanie skanera 3D oraz kamery termowizyjnej. Podejście takie pozwoli na dokładne określanie topografii próbki pomiarowej za pomocą skanera 3D. Zastosowanie kamery termowizyjnej pozwoli natomiast uniknąć ścisania próbki. Wyniki pomiarów będą obciążone mniejszymi błędami pomiarowymi.

### Streszczenie

*Pomimo stosowania w kabinach lakierniczych filtrów typu „paint stop”, wyrzucane z komory powietrze zawiera cząstki stałe mgły lakierniczej. Cząstki lakieru odkładają się na ściankach wewnętrznych kanałów wyrzutni, dotyczy to również ścianek rekuperatorów. Powstający osad stanowi opór cieplny podczas wymiany ciepła w rekuperatorze. Aby określić stopień spadku sprawności odzysku ciepła należy znać przewodność cieplną wspomnianych osadów. Do tej pory nie spotkano wyników badań przewodności cieplnej osadów lakierów. W artykule przedstawiono metodykę wstępnych badań eksperymentalnych przewodności cieplnej próbek osadu lakierów pobranych z kabiny lakierniczej.*

## Measurement methodology of the paint sediment's thermal conductivity

### Abstract

*Despite the use of a filters type "paint Stop" at spray booth, ejected air from the painting chamber contains particles of overspray. Paint particles create sediments on the inner walls of the extraction ducts; this also applies to the walls of the recuperators. The sediments are the thermal resistance of the heat exchange in the recuperators. To determine the degree of the heat recovery efficiency decrease, the thermal conductivity of these sediments must be known. The paper presents the methodology of the preliminary experimental studies of paint sediment thermal conductivity. The sediment's samples were collected from the paint booth.*

### BIBLIOGRAFIA

1. Bendada A., Sensitivity of thermal-wave interferometry to thermal properties of coatings: application to thermal barrier coatings, MEASUREMENT SCIENCE AND TECHNOLOGY 13 (2002) p.1946–1951
2. Chan TL, D'Arcy JB, Schreck RM. High-solids paint overspray aerosols in a spray painting booth: particle size analysis and scrubber efficiency. Am Ind Hyg Assoc J; 47: 411–17.
3. Darvin C. H., Cox L. S. & Smith D., Comparative Study of Spray Booth Filter System Efficiency, Journal of the Air & Waste Management Association (1999), 49:3, p. 339-344
4. Jackson J. D., Htchman J.C., Measurement of the thermal resistance of paint coatings using a simple transient cooling method Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, February 1, (1999) 213: 45-56,
5. Legaie D, Pron H. and Bissieux C., Characterization of a black paint layer by photothermal lock-in thermography, Parameter identification in the Hankel space, Quantitative InfraRed Thermography Journal, Volume 4 – N° 2/2007, pages 201-218.

6. Nikończuk P., *Odzysk ciepła w kabinach lakierniczych*, Auto Moto Serwis, nr 9/2011, p. 40-43 ,
7. Nikończuk P., Study of Heat Recovery in Spray Booths, Metal Finishing 2013 Vol. 111 (6) p. 37-39,
8. Nikończuk P., Preliminary analysis of heat recovery efficiency decrease in paint spray booths, Transactions of the IMF 2014 VOL 92 NO 5,
9. Nikończuk P., Królikowski T., Rypina Ł., Stempnakowski Z., Wstępna analiza korzyści ze stosowania innowacyjnego rozwiązania odzysku ciepła w kabinach lakierniczych, Logistyka 09/2014; 2014(3):4666-4672,
10. Recknagel – Sprenger, Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik, 57. Ausgabe. R. Oldenbourg, München 1972,
11. Wright S. R., Bond J. H., (1998) Hazardous waste Minimization of paint overspray via medialess dynamic particle filtration, Final Report 25 Apr 97 -25 Jan 98, INNOVATECH, INC,