

ROCHATKA Tomasz<sup>1</sup>

## **WYZNACZENIE STRUMIENIA CIEPŁA PRZENIKAJĄCEGO PRZEZ MOSTEK CIEPŁA W NADWOZIU CHŁODNICZYM NA PODSTAWIE ZDJĘCIA TERMOWIZYJNEGO**

*Badania termowizyjne zabudów chłodniczych pozwalają zarejestrować mostki cieplne (lokalizacja, rozmiar), pozwalają ocenić jakościowo strumień ciepła (mały, średni, duży, bardzo duży), jednak brakuje metod wyznaczenia strumienia ciepła  $Q$   $W/m^2$ . W pracy przedstawiono metodę wyznaczania strumienia ciepła w obrębie mostka cieplnego na podstawie zdjęcia termowizyjnego. Badania prowadzono dla warunków testów izolacji nadwozi chłodniczych w celu interpretacji skali destrukcji materiału izolacyjnego. Wykorzystano metodę porównania temperatur zarejestrowanych na: powierzchni płyty obciążonej znanym strumieniem ciepła oraz powierzchni płyty kontrolnej, która nie była obciążona strumieniem ciepła.*

## **IDENTIFICATION OF HEAT FLUX IN THERMAL BRIDGES IN MECHANICAL REFRIGERATED BODIES BY USING OF THERMOVISION PHOTOS**

*The thermovision tests of insulated bodies enable to indicate the thermal bridges (localization, size). They also enable to evaluate qualitatively the heat flux (small, large, very large), but there is the significant lack of methods for setting the density of heat flux  $Q$   $W/m^2$ . In the article the method for setting the density of heat flux in the range of thermal bridge based on thermovision photo. The research was carried out for test conditions of isolation of cooling bodies in order to interpretation of destruction rate of insulating material. The method of comparing registered temperatures on the surface of plate stressed with known heat flux and surface of reference plate which was not stressed with the heat flux was applied.*

### **1. WSTĘP**

Kamera termowizyjna jest to urządzenie, które rejestruje natężenie promieniowania elektromagnetycznego, emitowanego przez każde ciało, którego temperatura jest wyższa niż 0K. Na podstawie tego promieniowania oraz licznych zależności mikroprocesor wylicza temperaturę powierzchni. Ponieważ współczesne kamery termowizyjne posiadają detektory

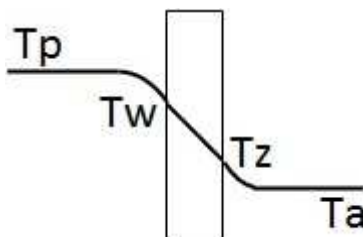
---

<sup>1</sup>Politechnika Poznańska, Instytut Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań, tel. +48 61 66-52-655, fax +48 61 66-52-855, E-mail: tomasz.rochatka@put.poznan.pl

matrycowe zbudowane z pojedynczych detektorów (najczęściej 320x240 pikseli), wykonując pojedyncze zdjęcie, użytkownik uzyskuje mapę temperatury powierzchni na obszarze, na który jest skierowany obiektyw kamery termowizyjnej. Na potrzeby termowizji wykorzystuje się 2 pasma promieniowania podczerwonego: krótkofalowe (SW) 2-5 $\mu\text{m}$  oraz długofalowe (LW) 8-14 $\mu\text{m}$ .

Zobrazowanie rozkładu temperatur (za pomocą kamery termowizyjnej) na powierzchni, szczególnie materiałów izolacyjnych, jest punktem wyjścia do dalszej analizy wymiany ciepła. Kamera termowizyjna pozwala zlokalizować miejsca o innej temperaturze, niż temperatura otoczenia. Po wprowadzeniu do kamery parametrów obiektu (emisyjność, temperatura powietrza, wilgotność względna, odległość od obiektu, odbita temperatura pozorna) można dość dokładnie ( $\pm 2^\circ\text{C}$ ) zmierzyć wartość temperatury w sposób bezkontaktowy [1]. Jednak temperatura powierzchni nie daje bezpośredniej odpowiedzi, jaka jest wartość lokalnego współczynnika przenikania ciepła  $k$   $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$  zabudowy chłodniczej ( $U$   $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$  przegrody budowlanej) lub jaka jest wartość strumienia ciepła  $Q$   $\text{W}/\text{m}^2$ , który przepływa przez przegrodę.

Dla przegrody wykonanej z jednorodnego pod względem własności cieplnych materiału, dla układu w stanie równowagi cieplnej można przyjąć model jednowymiarowy wymiany ciepła (rys. 1.)



Rys. 1. Rozkład temperatur przy wymianie ciepła przez przegrodę;  $T_p$  – temperatura powietrza w pomieszczeniu  $K$ ;  $T_w$  – temperatura powierzchni przegrody wewnątrz pomieszczenia,  $K$ ;  $T_z$  – temperatura powierzchni przegrody na zewnątrz,  $K$ ;  $T_a$  – temperatura powietrza na zewnątrz,  $K$

Na wymianę ciepła składają się 3 zjawiska przekazania ciepła:

- wnikanie ciepła od cieplejszego powietrza do powierzchni przegrody,
- przewodzenie ciepła w objętości przegrody,
- odprowadzenie ciepła od chłodniejszej powierzchni przegrody do powietrza.

W rozpatrywanym jednowymiarowym modelu wymiany ciepła ilość ciepła dla każdego etapu przekazania ciepła jest równa. Ilość ciepła, jaka wnika do przegrody jest równa ilości ciepła, jaka drogą przewodzenia przenika przez przegrodę oraz jest równa ilości ciepła, jaka jest odprowadzana do powietrza o niższej temperaturze.

Wyznaczenie strumienia ciepła  $Q$   $\text{W}/\text{m}^2$ , przenikającego przez przegrodę budowlaną najczęściej dokonuje się w oparciu o pomiary temperatur powierzchni przegrody po obu stronach (równania 1, 2) [2]:

$$Q = U (T_p - T_a) \text{ W}/\text{m}^2 \quad (1)$$

gdzie:  $U$  – współczynnik przewodzenia ciepła przez przegrodę  $W/(m^2K)$

$$U = \frac{\alpha_w \alpha_z (T_p - T_w)}{\alpha_z (T_p - T_z) + \alpha_w (T_p - T_w)} \frac{W}{m^2 * K} \quad (2)$$

gdzie :  $\alpha_w$  – współczynnik przyjmowania ciepła po stronie wewnętrznej,  $W/(m^2K)$

$\alpha_z$  – współczynnik przyjmowania ciepła po stronie zewnętrznej,  $W/(m^2K)$

W budownictwie opisana metodyka sprawdza się, między innymi, dlatego, że jest stosunkowo swobodny dostęp do obydwu stron przegrody, obiekty są stosunkowo duże i często wykonane są z materiałów o dużej pojemności cieplnej. W trakcie badania przechodzenie między strefą ciepłą (wewnątrz obiektu) a strefą zimną (otoczeniem) nie powoduje istotnego zakłócenia temperatur w obiekcie. Kolejnym powodem wykorzystania opisanej metody jest fakt, że w ramach obiektu występują duże powierzchnie o jednakowych lub podobnych własnościach cieplnych i dokładność położenia punktów pomiarów temperatury na powierzchni nie wpływa znacząco na dokładność oszacowania współczynnika przenikania ciepła.

W odmiennej sytuacji są badacze zajmujący się wyznaczaniem strat ciepła nadwozi chłodniczych. Obiekt – nadwozie chłodnicze - jest zdecydowanie mniejszy i z materiałów o mniejszej pojemności cieplnej. Każde otwarcie drzwi (o stosunkowo dużej powierzchni w stosunku do powierzchni przegród – 2-8% zabudowy) skutkuje rozchwianiem równowagi termicznej na okres, co najmniej kilku godzin. W takich warunkach można uznać, że wejście z kamerą termowizyjną i wykonanie pomiarów od środka nie wchodzi w rachubę.

Kolejnym trudnym do spełnienia warunkiem jest dokładne ustalenie pozycji mostka ciepła (fragment o gorszych własnościach izolacyjnych niż zasadnicza część przegrody) z dokładnością do piksela tak, aby poszczególne fragmenty mostka były z obu stron przegrody dokładnie zidentyfikowane temperaturowo.

Eksploatacyjne mostki ciepła [3] charakteryzują się dużym gradientem temperatury powierzchni, na stosunkowo małych powierzchniach, dlatego tak ważne jest dokładne wykonanie pomiarów temperatury na obu powierzchniach przegrody. Od strony praktycznej wykonanie tego zadania pomiarowego wydaje się być nierealne.

Jeżeli nie można wykonać pomiarów temperatury powierzchni (lub są bardzo trudne technicznie) z obu stron, należy się skupić na dwóch pozostałych ogniwach przekazujących ciepło od strefy ciepłej do zimnej – pomiarem ciepła wnikania lub przyjmowania. Mimo niewielkiej powierzchni mostka ciepła w stosunku do pozostałej powierzchni izolacji ich wpływ na własności izolacyjne całego układu izolacyjnego może być znaczny. Na podstawie badań własnych można oszacować, że mostki ciepła wprowadzają do nadwozia chłodniczego dodatkowo 30-40% ciepła w stosunku do nadwozia idealnego wykonanego z materiału izolacyjnego bez mostków ciepła.

Dlatego podjęto próbę opracowania metody wyznaczania strumienia cieplnego, przepływającego przez mostki cieplne na podstawie rozkładu temperatur powierzchni, odczytanego ze zdjęcia termowizyjnego analizowanego mostka.

## 2. KONCEPCJA METODY BADAWCZEJ

Aby można było wykorzystać wyniki pomiaru temperatury z kamery termowizyjnej należy powiązać różnicę temperatur odczytaną z termogramu ze strumieniem ciepła przepływającym przez przegrodę, który powoduje wzrost temperatury na powierzchni. Aby wyliczyć gęstość strumienia ciepła przenikającego przez przegrodę (budowlaną, izolację zimnochronną a szczególnie mostki cieplne) ze zdjęcia termowizyjnego należy „wyskalować” kamerę termowizyjną. Skalowanie powinno się odbywać znanym strumieniem cieplnym, którego wartość powinna być zmierzona inną metodą.

Dla „wygenerowania” strumienia ciepła należy za pomocą osłony wydzielić strefę o innej temperaturze niż otoczenie. Wewnątrz osłony należy umieścić skrzynkę grzewczą, pozwalającą zmierzyć strumień ciepła, przenikający przez powierzchnię osłony. Przepływający przez materiał osłony strumień ciepła podnosi temperaturę powierzchni w stosunku do powierzchni płyty kontrolnej, przez którą ciepło nie przepływa. Kamera termowizyjna powinna rejestrować obraz osłony termicznej „obciążonej” wzorcowym strumieniem ciepła, na powierzchni, której wzrasta temperatura oraz płyty kontrolnej, przez którą ciepło nie przepływa.

Dla realizacji takich warunków cieplnych wewnątrz osłony cieplnej i skrzynki grzewczej instaluje się nagrzewnice elektryczne, a w komorze badawczej, w której prowadzone są badania utrzymuje się temperaturę 7,5 °C za pomocą urządzeń chłodniczych. Ze względów technicznych prościej i dokładniej można mierzyć moc grzewczą uzyskaną na drodze elektrycznej (wydzielenie się ilości ciepła na grzałce można mierzyć za pomocą watomierza) niż moc chłodniczą, jako iloczyn: ciepła właściwego, różnicy temperatur i strumienia cieczy chłodzącej. Dla metody wewnętrznego źródła ciepła umowa ATP [4] wymaga dokładności pomiaru globalnego współczynnika przenikania ciepła na poziomie 5%, natomiast dla dopuszczonej metody tzw. wewnętrznego źródła chłodu wymagana dokładność pomiaru globalnego współczynnika przenikania ciepła wynosi 10%.

Do jednej ze ścian sześcianu jest dostawiona skrzynka grzewcza wyposażona w swoją nagrzewnicę. Zadaniem skrzynki grzewczej jest zmierzenie strumienia cieplnego przenikającego przez ścianę sześcianu. Po doprowadzeniu do równowagi termicznej układu: osłona cieplna – skrzynka grzewcza, ciepło wydzielone w nagrzewnicy skrzynki grzewczej nie przepływa przez obudowę skrzynki gdyż temperatury w osłonie cieplnej i skrzynce grzewczej są równe, lecz tylko przez fragment osłony cieplnej, do której jest przyłożona skrzynka grzewcza. Jest to strumień ciepła, który zostanie użyty do „skalowania” kamery termowizyjnej.

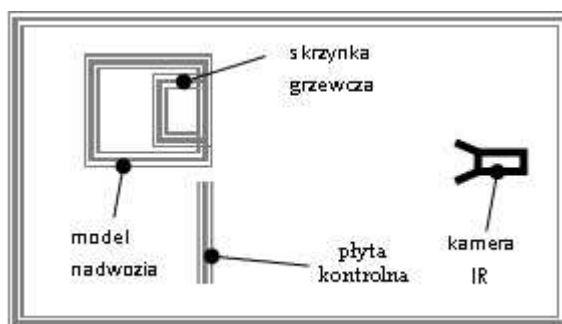
## 3. BUDOWA STANOWISKA

Zasadniczym elementem stanowiska jest model nadwozia chłodniczego w formie sześcianu, przystosowany do zamontowania ścian z modelami mostków cieplnych. We wnętrzu modelu jest umieszczona nagrzewnica oraz czujniki temperatury Pt100, mierzące temperaturę wewnątrz modelu nadwozia. Do jednej ze ścian od wewnątrz jest dosunięta skrzynka grzewcza wyposażona w swoją nagrzewnicę oraz czujniki temperatury Pt100. Zadaniem nagrzewnic jest utrzymanie jednakowej temperatury w modelu nadwozia i w skrzynce grzewczej. Dzięki identycznej temperaturze w modelu i skrzynce grzewczej nie

występuje przepływ ciepła przez ścianki skrzynki grzewczej a cały strumień ciepła ze skrzynki grzewczej przepływa przez przegrodę (ściankę modelu nadwozia), do której jest dosunięta skrzynka.

Obok modelu nadwozia jest umieszczona płyta kontrolna, która nie jest obciążona strumieniem ciepła. Płyta kontrolna to dodatkowa płyta wykonana z tych samych materiałów (i o tym samym współczynniku emisyjności,  $\epsilon$  co płyty modelu nadwozia). Dzięki temu porównuje się temperatury na powierzchni „obciążonej cieplnie” strumieniem ciepła, kontrolowanym za pomocą skrzynki grzewczej oraz powierzchni kontrolnej w tych samych warunkach i z możliwie najmniejszym błędem.

Wymieniając płytę – ścianę modelu nadwozia oraz zmieniając w niewielkich granicach nastawy temperatur wewnątrz modelu nadwozia i skrzynki grzewczej, uzyskano różne strumienie ciepła w zakresie 20 – 90 W/m<sup>2</sup>. Schemat stanowiska przedstawia rys. 2.

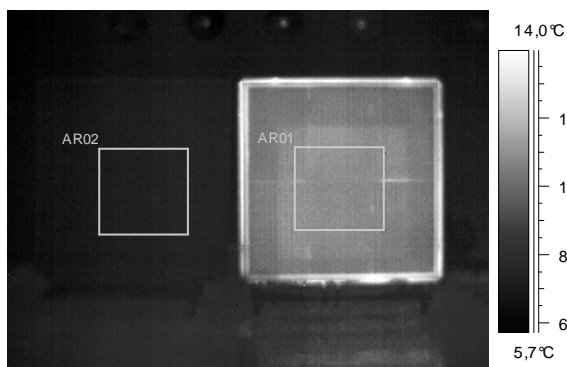


Rys. 2. Schemat stanowiska do rejestracji strumienia ciepła za pomocą kamery termowizyjnej

#### 4. ANALIZA TERMOGRAMÓW

Oprogramowanie ThermaCAM Reporter 2000 Professional, dołączone do kamery termowizyjnej, pozwala na analizy zdjęć termowizyjnych i odczytanie temperatur na powierzchni. Wskazując obszar na zdjęciu termowizyjnym można wyznaczyć między innymi wartość średnią temperatury dla zaznaczonego pola, odchylenie standardowe i inne. (rys. 3.)

Emisyjność badanego obiektu (laminatu epoksydowo-szklanego) wyznaczono za pomocą modyfikacji parametru  $\epsilon$  tak, aby wskazania temperatury kamerą termowizyjną były zgodne ze wskazaniami termometru stykowego mierzącego temperaturę powierzchni (o dokładności 0,2°C), obserwowanej kamerą termowizyjną. Wartość emisyjności laminatu oszacowano na ok. 0,70.



Rys. 3. Zdjęcie termowizyjne płyty obciążonej strumieniem ciepła (po prawej) i płyty kontrolnej (po lewej) z zaznaczonymi obszarami analiz AR01 i AR02

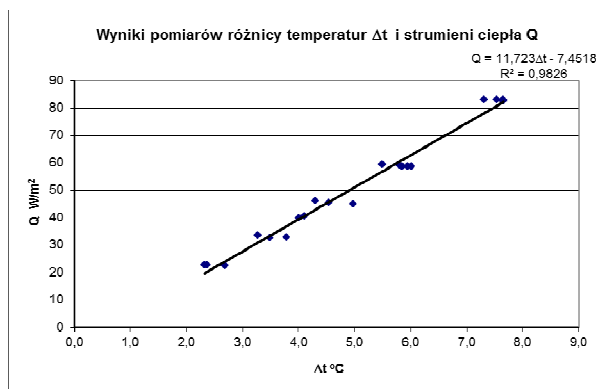
W tabeli 1. przedstawiono kilka przykładowych wyników analizy zaznaczonych obszarów (ze zdjęcia przedstawionego na rys. 3).

Tab. 1. Przykładowe wyniki analizy zaznaczonych obszarów ze zdjęcia termowizyjnego przedstawionego na rys. 3

	AR01	AR02
średnia temp. obszaru	11,0 °C	7,3 °C
odchylenie standardowe	0,2 °C	0,2 °C
max. temp. obszaru	12,2 °C	7,9 °C
min. temp. obszaru	10,3 °C	6,6 °C

## 5. WYNIKI POMIARÓW

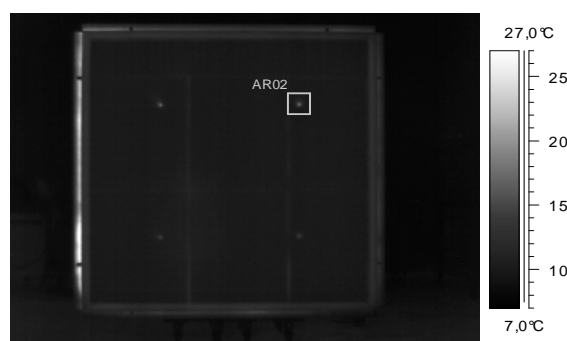
Aby mieć pewność, że odczytane ze zdjęcia termowizyjnego wyniki nie zawierają niepewności związanej z wahaniami temperatury w komorze badawczej (7,0-8,0 °C) z powodu okresowości pracy sprężarek układu chłodniczego, przedstawiona analiza przykładowego, jednego zdjęcia musi być powtórzona dla całej serii zdjęć termowizyjnych obejmujących 60 zdjęć rejestrowanych, co 1 min. Na podstawie wyników pomiarów temperatur w obszarach analizowanych AR01 i AR02 została obliczona różnica temperatur dla serii 60 zdjęć a na podstawie tych różnic cząstkowych obliczono średnią różnicę temperatur dla serii. Rys. 4. przedstawia uśrednione 1 godzinowe wyniki badań różnicy temperatury dla różnych wartości strumienia ciepła. Dodatkowo na wykresie przeprowadzono analizę regresji. Współczynnik korelacji  $R^2=0,98$  oznacza, że w badanym zakresie dla warunków badania zgodnych z wymaganiami umowy ATP, strumień ciepła i różnica temperatur, obserwowane kamerą termowizyjną jest zależnością prawie liniową.



Rys. 4. Wyniki pomiarów różnicy temperatur dla różnych strumieni ciepła

## 6. ZASTOSOWANIE PRAKTYCZNE

Jako przykład wykorzystania opracowanej zależności strumienia ciepła od różnicy temperatur została przedstawiona analiza mostka ciepła ze zdjęcia termowizyjnego przedstawionego na rys. 5.



Rys. 5. Zdjęcie termowizyjne mostka ciepła poddanego analizie

Rysunek 5. przedstawia zdjęcie termowizyjne płyty z mostkami ciepła wykonanymi z rdzeni aluminiowych o długości równej grubości materiału izolacyjnego, czyli 40 mm i średnic odpowiednio 5, 8, 10 i 12 mm. Analizie poddano mostek cieplny w obrębie obszaru zaznaczonego na zdjęciu termowizyjnym, jako AR02. Po wczytaniu zdjęcia termowizyjnego do programu Matlab, uzyskuje się dostęp do zapisu temperatur analizowanego obszaru.

Tab. 2. Zapis temperatur w K mostka ciepła z obszaru AR02 (rys. 5)

282,4	282,4	282,3	282,1	282,3	282,2	282,2	282,2	282,2	282,4	282,3	282,1	282,1
282,6	282,6	282,5	282,4	282,3	282,5	282,6	282,4	282,3	282,4	282,3	282,5	282,4
282,6	282,5	282,3	282,5	282,7	282,8	282,6	282,7	282,5	282,4	282,6	282,4	282,2
282,7	282,6	282,5	282,4	282,9	283,6	283,6	283,2	282,4	282,6	282,3	282,5	282,4
282,3	282,7	282,3	282,4	283,6	285,8	287,2	285,1	282,8	282,7	282,4	282,4	282,3
282,4	282,6	282,4	282,9	284,3	289,5	292,8	287,3	283,2	282,8	282,5	282,4	282,3
282,7	282,6	282,6	282,6	283,8	287,5	289,4	285,3	283,0	282,7	282,6	282,4	282,3
282,5	282,6	282,3	282,6	282,9	283,6	284,0	283,3	282,7	282,3	282,7	282,3	282,4
282,6	282,6	282,3	282,3	282,7	282,9	282,7	282,7	282,6	282,7	282,6	282,4	282,3
282,5	282,7	282,4	282,4	282,5	282,6	282,3	282,5	282,3	282,5	282,4	282,6	282,3
282,7	282,7	282,3	282,3	282,4	282,3	282,3	282,4	282,3	282,5	282,3	282,4	282,3
282,7	282,6	282,2	282,6	282,3	282,4	282,1	282,1	282,2	282,4	282,3	282,5	282,3

W tabeli 2 przedstawiono zapis temperatur na poszczególnych pikselach analizowanego fragmentu zdjęcia termowizyjnego. Średnia temperatura pikseli „otoczenia” mostka ciepła – zaznaczone **pogrubionym drukiem** – wynosi 282,36 K, czyli 9,2 °C. Jest to temperatura bazowa na podstawie, której będą obliczane straty ciepła na pikselach w obrębie mostka ciepła.

Tab. 3. Zapis wzrostów temperatury K na powierzchni mostka ciepła w stosunku do otoczenia obszaru mostka (średniej temperatury obszaru zaznaczonego w tabeli 2 **pogrubionym drukiem**)

0,2	0,1	0,0	0,0	0,2	0,2	0,1	-0,1	0,1	0,0	0,1
0,2	0,0	0,1	0,3	0,4	0,2	0,4	0,1	0,1	0,3	0,1
0,2	0,2	0,1	<b>0,6</b>	<b>1,2</b>	<b>1,2</b>	<b>0,8</b>	0,1	0,2	-0,1	0,2
0,4	0,0	0,1	<b>1,3</b>	<b>3,5</b>	<b>4,9</b>	<b>2,8</b>	0,5	0,4	0,1	0,1
0,3	0,1	<b>0,5</b>	<b>2,0</b>	<b>7,2</b>	<b>10,4</b>	<b>4,9</b>	<b>0,9</b>	0,4	0,2	0,1
0,2	0,2	0,3	<b>1,5</b>	<b>5,1</b>	<b>7,1</b>	<b>3,0</b>	<b>0,7</b>	0,3	0,2	0,1
0,2	-0,1	0,2	<b>0,5</b>	<b>1,2</b>	<b>1,6</b>	<b>1,0</b>	0,3	-0,1	0,4	0,0
0,2	-0,1	0,0	0,3	<b>0,5</b>	0,4	0,4	0,2	0,3	0,3	0,1
0,4	0,0	0,1	0,2	0,2	-0,1	0,1	-0,1	0,1	0,0	0,2
0,4	-0,1	0,0	0,1	-0,1	-0,1	0,0	-0,1	0,2	-0,1	0,1

Na obszarze mostka ciepła (tabela 3) zaznaczono **pogrubionym drukiem** piksele, w których zarejestrowano wyraźny wzrost temperatury o min. 0,5 °C w stosunku do obszaru kontrolnego – otoczenia mostka ciepła. W tych punktach przeprowadzono obliczenie strumienia ciepła wg zależności uzyskanej z regresji liniowej (wzór 3):

$$Q=11,723*dt-7,4518 \text{ W/m}^2 \quad (3)$$



Na podstawie zależności geometrycznych obiektu, odległości i parametrów optyki kamery termowizyjnej można obliczyć rozmiary poszczególnych pikseli i odnieść obliczone w tabeli 4. strumienie ciepła do powierzchni, wyliczając ile dodatkowego ciepła przenika przez mostek cieplny w stosunku do płyty z litej izolacji poza strefą oddziaływania mostka ciepła.

W analizowanym modelu pominięto wpływ rozptyłu ciepła po powierzchni płyty ze względu na przewodność cieplną laminatu.

Tab. 4. Wartości strumieni ciepła  $W/m^2$  dla poszczególnych punktów obszaru mostka ciepła

0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0	-0,8	6,7	7,1	1,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0	7,6	33,3	49,4	24,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	-1,2	15,4	76,4	114,6	50,2	2,8	0,0	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0	9,8	52,3	75,6	27,4	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0	-1,2	7,1	11,4	3,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0	0,0	-1,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Wg producenta laminatu (Vetroresina Italy) przewodność cieplna laminatu epoksydowo-szklanego używanego na poszycia zabudów chłodniczych wynosi  $\lambda_{lam}=0,056-0,072$  W/mK (średnio 0,064 W/mK) natomiast współczynnik przewodzenia ciepła rdzenia aluminiowego wynosi  $\lambda_{Al}=201$  W/mK.

Ciepło przepływa drogą przewodzenia przez rdzeń aluminiowy długości 40mm (grubość izolacji płyty modelu nadwozia) oraz przez poszycie laminatowe grubości 1,5mm.

Opory termiczne warstw przegrody dla rdzenia aluminiowego  $R_{thAl}$  oraz materiału poszycia  $R_{thlam}$  wynoszą (wzory 4 i 5):

$$R_{thAl} = \frac{\delta}{\lambda_{Al}} = \frac{0,04}{201} = 0,000199 \frac{K}{W} \quad (4)$$

$$R_{thlam} = \frac{\delta}{\lambda_{lam}} = \frac{0,0015}{0,064} = 0,023 \frac{K}{W} \quad (5)$$

Ponieważ opór termiczny rdzenia aluminiowego jest 115 razy mniejszy od oporu termicznego warstwy laminatu, wydaje się być usprawiedliwione pominięcie rozptyłu ciepła na boki po warstwie laminatu. Dla pełnej walidacji metody należałoby przeprowadzić obliczenia numeryczne z uwzględnieniem poszyci zarówno laminatowych jak i blaszanych. Planuje się wykorzystać pakiet ANSYS Fluent do obliczeń numerycznych.

## 7. WNIOSKI

W trakcie wyznaczania zależności podłużono się różnicą temperatury między ścianą przewodzącą ciepło (mierzone skrzynką grzewczą) a ścianą nieobciążoną strumieniem ciepła. Temperatura na tej ścianie to praktycznie temperatura powietrza w komorze. Taka metoda wyznaczania temperatury pozwoliła na rejestrację jednym urządzeniem (kamerą termowizyjną) obydwu temperatur. Dzięki takiemu zabiegowi uniknięto problemów z synchronizacją wyników z dwóch urządzeń pomiarowych: zdjęć z kamery termowizyjnej oraz wyników pomiaru temperatury powietrza z innego miernika z czujnikiem np. Pt100 1/5B DIN i ręcznego synchronizowania wyników na podstawie czasów pomiarów.

W przykładowej analizie, jako temperaturę odniesienia nie wykorzystano temperatury powietrza, lecz temperaturę otoczenia mostka, po to by oszacować wzrost strat ciepła przez mostek ciepła w stosunku do litej płyty z materiału izolacyjnego bez mostka ciepła. Gdyby istniała potrzeba wyznaczenia całkowitej straty ciepła przez mostek ciepła to należałoby skorzystać z temperatury powietrza do wyliczenia różnicy temperatur.

Wzrost strat ciepła przez mostek ciepła w stosunku do strat ciepła litej płyty z materiału izolacyjnego bez mostka jest bardziej czytelny dla osób, które muszą odpowiedzieć na pytanie, co należy poprawić lub naprawić, aby zredukować straty ciepła badanego nadwozia chłodniczego.

Przedstawiona metoda pozwoliła wyznaczyć zależność strumienia ciepła i różnicy temperatur. Na podstawie zdjęcia termowizyjnego mostka ciepła można wyznaczyć wzrosty temperatur na poszczególnych pikselach obrazu, a podstawiając różnice temperatur do równania regresji (3) można wyliczyć strumień ciepła w obrębie analizowanych pikseli obrazu termowizyjnego.

Pomiary współczynnika przenikania ciepła  $U$  znane w budownictwie zakładają dostęp do obydwóch stron przegrody dla przeprowadzenia wymaganych pomiarów. Opracowana metoda pozwala prowadzić analizę wymiany ciepła mając dostęp tylko z jednej strony przegrody.

## 8. BIBLIOGRAFIA

- [1] Więcek B., DeMey G: *Termowizja w podczzerwieni. Podstawy i zastosowania*, Wyd. PAK, Warszawa 2011, ISBN 978-83-926319-7-2
- [2] Minkina W. *Pomiary termowizyjne – przyrządy i metody*, Wyd. Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2004, ISBN 83-7193-237-5
- [3] Rochatka T., i inni, *Identyfikacja ukrytych wad (uszkodzeń) metodą termowizyjną [w:] Fizyczne podstawy diagnostyki układów termoizolacyjnych do transportu żywności*” Wyd. ITeE, Radom-Poznań, 2005, s. 64-92, ISBN 83-7204-440-6
- [4] *Umowa o międzynarodowych przewozach szybko psujących się artykułów żywnościowych i o specjalnych środkach transportu przeznaczonych do tych przewozów (ATP)*. Dziennik Ustaw PRL, Załącznik do nru 49, poz. 254 z dnia 26 października 1984r. (tekst angielski z uzupełnieniami z roku 2011) <http://live.unece.org/trans/main/wp11/atp.html>