

Marcin KAŁUŻA

POLITECHNIKA ŁÓDZKA, INSTYTUT ELEKTRONIKI,
ul. Wólczarska 211/215, 90-924 Łódź

Problem nagrzewania pierścieni pośrednich stosowanych w badaniach termowizyjnych

Dr inż. Marcin KAŁUŻA



Absolwent Wydziału Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki Politechniki Łódzkiej. Prowadzi badania nad spiralnymi cewkami scalonymi oraz nad zastosowaniami kamer termowizyjnych do badań układów scalonych i struktur półprzewodnikowych. Zainteresowania naukowe: modelowanie i zastosowania spiralnych cewek scalonych, termowizja, sensory. Od 2008 roku pracuje w Instytucie Elektroniki Politechniki Łódzkiej.

e-mail: marcin.kaluza@p.lodz.pl

Streszczenie

W przypadku konieczności obrazowania termowizyjnego obiektów o małych rozmiarach, z rozdzielczością sięgającą kilku lub kilkunastu mikrometrów na piksel, w kamerach termowizyjnych wykorzystywane są specjalne obiektywy mikroskopowe. W przypadku braku takiego obiektywu, alternatywą jest użycie pierścieni pośrednich, montowanych pomiędzy posiadanym obiektywem oraz obudową kamery. Zastosowanie pierścieni jest tanim i łatwo dostępnym rozwiązaniem, jeśli tylko mechaniczna budowa kamery na to pozwala. Ceną, jaką się za to płaci są jednak zniekształcenia uzyskiwanego obrazu, błędy pomiaru temperatury oraz wpływ promieniowania termicznego samych pierścieni na otrzymywane wyniki. Celem badań opisanych w niniejszym artykule było sprawdzenie, jak pierścienie pośrednie i ich nagrzewanie przez kamerę wpływają na otrzymywane wyniki pomiarów oraz na stabilizację temperatury samej kamery.

Słowa kluczowe: pomiary termowizyjne, pierścieni pośredni, obiektyw.

Problem of heating-up extension tubes used for thermographic measurements

Abstract

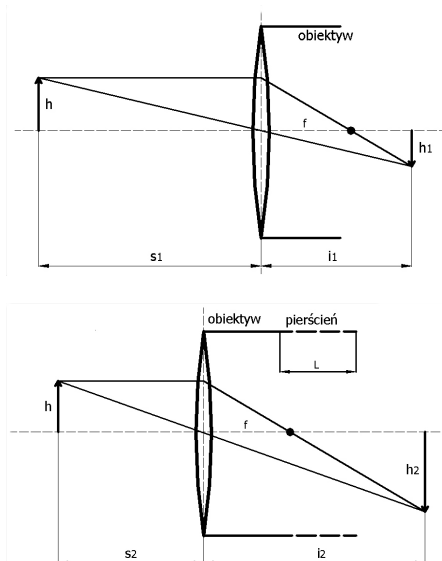
Infrared cameras has been used for years as one of the main tool for temperature measurements. When there is a need to image objects of sizes comparable to the detector matrix pixel pitch, microscope lenses are normally used. When such camera lens is for some reason not available, an interesting alternative is to use extension tubes mounted between the lens and the camera housing. However, that solution comes at the cost of: image distortions, temperature measurement errors and impact of the thermal radiation of the extension tube itself on the measurements or imaging. The goal of the research described in this paper was to investigate how screwing an extension tube to the camera housing and its heating will affect the measurement results and the temperature of the camera itself. The resume of the previous research concerning the application of extension tubes to thermography is presented in the introduction. The second section describes the physical phenomena and effects to be taken into account when adding an extension tube to an infrared camera lens, which are the modification of the imaged object – lens – detector matrix geometry leading to the changes of the configuration factor, the influence of the radiation coming from the extension tube itself and finally, the problem of the extension tube heating-up, when mounted on an IR camera. Next, in the third section there are presented the results of measurements made with an MWIR camera equipped with an extension tube and comparison of the results obtained using factory and custom non-uniformity correction. Because the impact of the thermal radiation coming from the tube itself is the greatest, when imaging objects at the room temperature or below RT, some examples of imaging of a linen composite structure (at RT, cooled or heated) are also given. The fourth section covers the conclusions based on the presented measurements results and requirements for further work. Extension tubes are an interesting alternative to microscopic lenses, especially for measurements, when only the phase of the signal is of interest. In general, extension tubes appear as an interesting tool, but care must be taken when using them, depending on the tube length, imaged object placement relatively to the lens axis, time duration of the measurement and measured object temperature. To get the best results, a custom NUC

and calibration of the camera is required, along with, if possible, cooling and temperature stabilization of the tube.

Keywords: thermographic measurements, extension tube, camera lens.

1. Wstęp

W trakcie badań termowizyjnych bardzo często pojawia się konieczność obrazowania obiektów o małych rozmiarach, z rozdzielczością sięgającą kilku lub kilkunastu mikrometrów na piksel. Stosuje się wtedy obiektywy mikroskopowe, a w szczególnych przypadkach obiektywy immersyjne SIL, umożliwiające obecnie obrazowanie za pomocą kamer termowizyjnych MWIR z rozdzielczością zbliżoną do 1 μm na piksel, a więc poniżej granicy dyfrakcji. W przypadku braku takich obiektywów, alternatywą pozostaje użycie posiadanego obiektywu i zamontowanie pomiędzy nim oraz obudową kamery pierścieni pośrednich.



Rys. 1. Geometria uproszczonego układu optycznego obiektywu bez pierścienia pośredniego (górny rysunek) oraz z pierścieniem pośrednim (dolny rysunek)
Fig. 1. Geometry of a simplified lens setup without extension tube (upper drawing) and with an extension tube (lower drawing)

Dla uproszczonego układu optycznego, w którym obiektyw zastąpiono pojedynczą soczewką o ogniskowej f , przedmiot i jego obraz są powiązane następującym równaniem:

$$\frac{1}{s_1} + \frac{1}{i_1} = \frac{1}{f}, \quad (1)$$

gdzie: f - ogniskowa obiektywu, s_1 - odległość obiekt obiektyw, i_1 - odległość obiektyw matryca detektorów.

Powiększenie w takim układzie można opisać wzorem:

$$m_1 = \frac{h_1}{h} = \frac{i_1}{s_1} = \frac{i_1 - f}{f}, \quad (2)$$

Jeśli teraz do układu optycznego dodamy pierścien pośredni o długości L , spowoduje to zwiększenie odległości detektor – soczewka, do wartości i_2 , gdzie

$$i_2 = i_1 + L \quad (3)$$

Ustawienie ostrości obrazu (skupiania go na matrycy detektorów) wymaga zmniejszenia odległości pomiędzy obiektywem i obrazowanym obiektem. Wzór (2) przyjmie wtedy postać (4):

$$m_2 = \frac{h_2}{h} = \frac{i_2}{s_2} = m_1 + \frac{L}{f}, \quad (4)$$

Dodanie pierścienia spowodowało k -krotne powiększenie obrazu:

$$k = \frac{h_2}{h_1} = \frac{m_2}{m_1}, \quad (5)$$

Choć pomysł zastosowania pierścieni pośrednich w badaniach termowizyjnych nie jest nowy [1], niewiele uwagi poświęcono dotychczas zbadaniu ich wpływu na dokładność pomiaru temperatury i jakość zobrazowania termowizyjnego. Pierwszą taką analizę przedstawiono w pracach [2-3]. Do opisanych tam badań zastosowano kamerę Cedip Titanium, wyposażoną w chłodzoną matrycę InSb o rozdzielczości 640 x 512 pikseli (rozmiar piksela 15 μm). Kamera była wyposażona w obiektyw o ogniskowej $f = 50$ mm o liczbie otworowej F#2, umożliwiający uzyskanie ostrego obrazu w zakresie od 30 cm do nieskończoności.

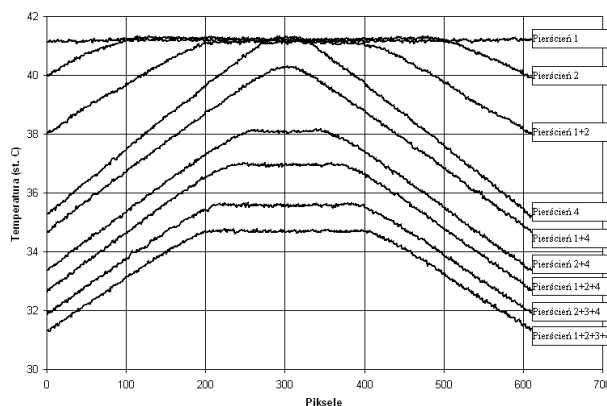
W badaniach wykorzystano cztery wykonane z anodowanego aluminium pierścienie pośrednie o długości, odpowiednio, pierścieni nr 1 – 12 mm, pierścieni nr 2 – 30 mm, pierścieni nr 3 – 30 mm, pierścieni nr 4 – 60 mm, co pozwoliło na uzyskanie kombinacji pierścieni o długości od 12 do 132 mm (rys. 2).



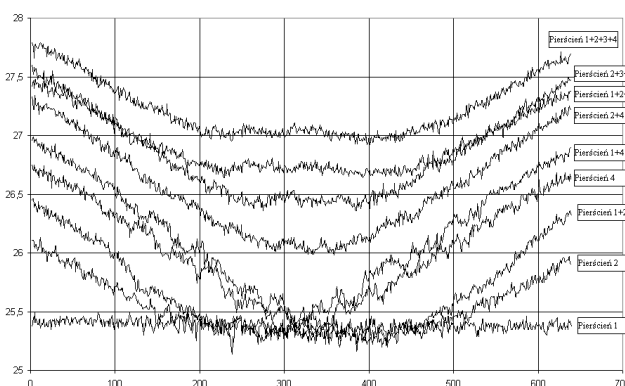
Rys. 2. Pierścienie pośrednie [1]
Fig. 2. Extension tubes [1]

Założenie pierścieni pośrednich pomiędzy obiektyw a matrycę detektorów kamery termowizyjnej z jednej strony umożliwiło kilku-kilkunastokrotne powiększenie obrazowanych przedmiotów, w stosunku do konfiguracji bez pierścieni, lecz z drugiej strony wprowadziło zniekształcenia obrazu i błędy pomiarowe. Dla kolejnych układów pierścieni, dla których odległość pomiędzy obiektywem oraz badanym obiektem była większa od ogniskowej użytego obiektywu, pomiar temperatury w osi obiektywu pozwalał uzyskać wyniki zbliżone z wynikami pomiarów bez pierścieni. W miarę dodawania kolejnych pierścieni obszar w środku matrycy detektorów, w który uzyskiwano poprawny wynik pomiaru malał. Im bliżej krawędzi matrycy detektorów, tym błąd pomiaru był większy. Dla odległości obiektyw – ciało doskonale czarne zbliżonej do wartości ogniskowej obiektywu, przekrój mierzonej temperatury przyjął kształt stożka (rys. 3 i 4). W miarę dalszego zwiększania sumarycznej długości zastosowanego pierścienia, zaobserwowano wzrost różnicy pomiędzy ustawioną temperaturą ciała doskonale czarnego oraz temperaturą zmierzoną za pomocą kamery.

Ogólnie, przebiegi o kształcie Λ (rys. 3) uzyskiwano dla temperatury badanej powierzchni przynajmniej o kilka stopni większej od temperatury otoczenia. Jeśli temperatura badanej powierzchni była zbliżona do temperatury otoczenia, uzyskiwane przebiegi miały kształt V (rys. 4). Postanowiono dokładniej zbadać ten problem i określić, jaki wpływ na wyniki pomiarów ma temperatura samych pierścieni, czy i w jakim stopniu zmienia się ona w trakcie pomiarów oraz, jak zredukować wpływ tego zjawiska.



Rys. 3. Przebiegi temperatury dla poziomych przekrojów przez obrazowaną powierzchnię ciała doskonale czarnego (41°C) [1]
Fig. 3. Temperature diagrams for horizontal cross-sections across the imaged black-body surface (41°C) [1]

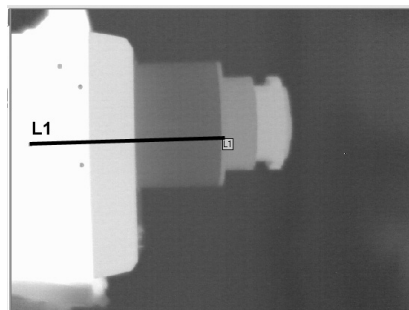


Rys. 4. Przebiegi temperatury dla poziomych przekrojów przez obrazowaną powierzchnię czarnej ceramicznej płytki (temperatura pokojowa) [1]
Fig. 4. Temperature diagrams for horizontal cross-sections across the imaged black ceramic plate surface (ambient temperature) [1]

Do badań wykorzystano ten sam, co poprzednio układ kamera termowizyjna/obiektyw/pierścienie. Badania przeprowadzono dla różnych możliwych długości pierścieni, od 12 do 132 mm. Ze względów praktycznych zostaną przedstawione tylko wyniki uzyskane dla pierścienia o długości 60 mm.

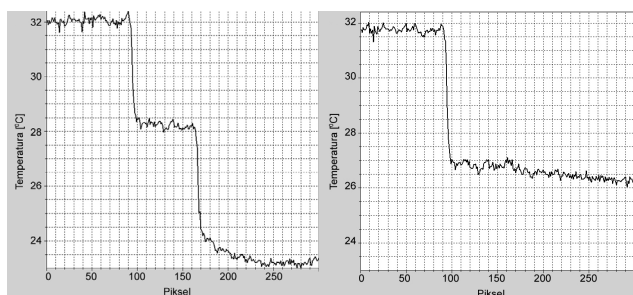
2. Pomiary temperatury pierścieni pośrednich

Pierwszym etapem badań było określenie, czy i w jakim stopniu temperatura przykręconego do kamery pierścienia wpływa na pomiary oraz, czy jest ona stała w czasie. Po uruchomieniu kamery Cedip Titanium odczekano, aż jej wewnętrzna temperatura, mierzona przez wbudowany czujnik, ustabilizuje się.



Rys. 5. Obraz termowizyjny kamery Cedip Titanium z pierścieniem pośrednim 60 mm
Fig. 5. Thermal image of the Cedip Titanium camera with a 60 mm extension tube

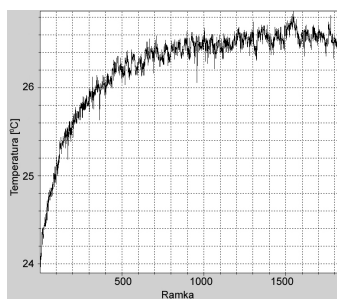
Obudowa kamery składa się z metalowego bloku z radiatorem, do którego przykręcono z przodu interfejs obiektywu. Interfejs i blok są odseparowane od siebie szczeliną powietrzną, dzięki temu w trakcie pracy kamery interfejs ma zawsze temperaturę o kilka stopni niższą od bloku. Po upływie ½ h od chwili uruchomienia kamery, pomiędzy obiektyw i kamerę przykręcono pierścien pośredni i za pomocą drugiej kamery termowizyjnej (kamera LWIR Jenoptik z matrycą niechłodzoną) zmierzono temperaturę układu (rys. 6 – lewy). Widoczna jest różnica temperatury pomiędzy blokiem obudowy i interfejsem, wznosząca 4°C. Pierścień ma temperaturę otoczenia i jest o kolejne 5°C zimniejszy.



Rys. 6. Wykres temperatury zmierzonej wzdłuż linii L1 w chwili założenia pierścienia (po lewej) i po upływie 30 minut (po prawej)

Fig. 6. Temperature measured along the L1 line at the moment of mounting the extension tube (left) and after 30 minutes (right)

Rejestrowano proces nagrzewania pierścienia przez obudowę kamery (rys. 7). Po upływie ½ godz. temperatura pierścienia ustabilizowała się i zrównała z temperaturą interfejsu obiektywu. Widać, że pierścień działa tutaj jak radiator, obniżając temperaturę interfejsu. Jest oczywiste, że zmiany warunków otoczenia (temperatura, ruchy powietrza) będą wpływały na zmiany temperatury obudowy samej kamery, a więc również i na sam pierścień. Przeprowadzając podobne pomiary dla różnych wartości temperatury otoczenia, od kilkunastu do ok. 30°C stwierdzono jednak, że niezależnie od bezwzględnych wartości otrzymanych temperatur układu blok obudowy - interfejs - pierścień, różnice pomiędzy tymi elementami pozostawały zbliżone.

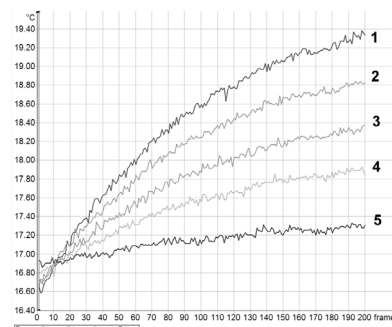


Rys. 7. Wykres zmian temperatury pierścienia w czasie (1 ramka/s)

Fig. 7. Diagram of the extension tube temperature change in time (speed 1 fps)

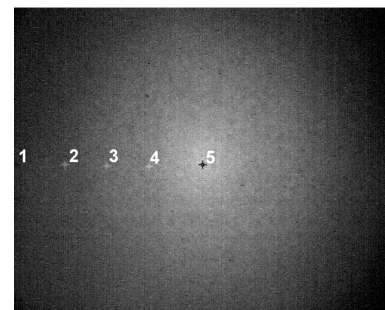
Po zbadaniu zmian temperatury samych pierścieni pośrednich, postanowiono zbadać, jak te zmiany wpływają na wartość mierzonej przez kamerę temperatury. Jako wzorzec temperatury zastosowano ciało doskonale czarne. Po upływie ½ godz. od uruchomienia kamery, pomiędzy obiektyw i kamerę przykręcono pierścien pośredni i rozpoczęto rejestrację temperatury powierzchni wzorcowej ciała, która była utrzymywana na poziomie 17°C (temperatura otoczenia). Wraz z upływem czasu zaobserwowano, że stwierdzone wcześniej nagrzewanie się pierścienia powodowało wzrost mierzonej wartości temperatury. Otrzymane wyniki przedstawiono na rys. 8. Dla punktu centralnego (5), dla pierścienia 60 mm wzrost mierzonej temperatury był niewielki (rzędu 0,2°C), natomiast na krawędzi matrycy detektorów (1), przekraczał 3°C. Otrzymane wyniki są zgodne z charakterystykami przedstawio-

nymi na rys. 3 i potwierdzają wpływ promieniowania (a więc i temperatury) samych pierścieni. Im dłuższy pierścień, tym wpływ ten jest większy. Jest to szczególnie widoczne w przypadku badania powierzchni o temperaturze zbliżonej do otoczenia, czyli niższej o kilka stopni od temperatury samego pierścienia nagrzanego przez kamerę. Próba redukcji promieniowania cieplnego pierścienia poprzez pokrycie jego wewnętrznej powierzchni folią aluminiową (mała wartość emisyjności) nie przyniosła spodziewanych efektów. Zmalało promieniowanie własne pierścienia, lecz zaczął on wtedy odbijać promieniowanie ciepłe wnętrza kamery, co prowadziło nawet do jeszcze większych błędów.



Rys. 8. Wykres zmian mierzonej temperatury, spowodowanych nagrzewaniem się pierścienia pośredniego (0,1 ramki/s)

Fig. 8. Diagram of the measured temperature changes, caused by extension tube heating (0.1 fps)



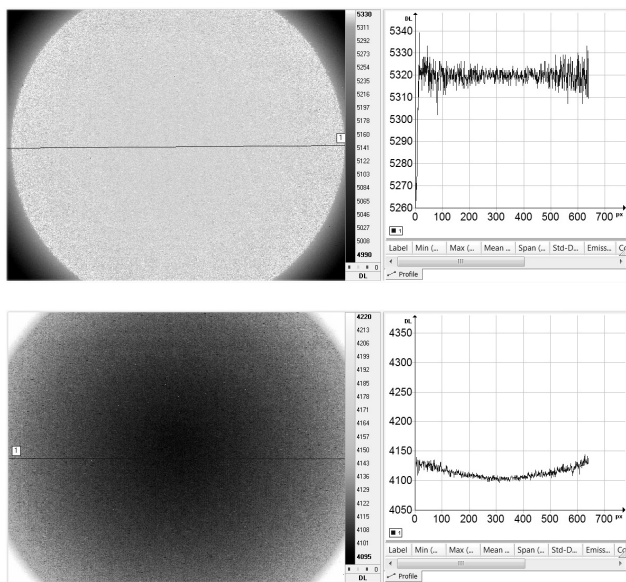
3. Korekcja niejednorodności dla kamery z pierścieniem pośrednim

Zastosowana w badaniach kamera termowizyjna Cedip Titanium oraz jej oprogramowanie umożliwia wyłączenie fabrycznej korekcji NUC oraz kalibracji i wygenerowanie własnych współczynników korekcji.

Program Altair umożliwia przeprowadzenie korekcji jednopunktowej lub dwupunktowej. Korekcja dwupunktowa może być uproszczona lub też zaawansowana, z uwzględnieniem zmian temperatury obudowy kamery.

Wykorzystując posiadane ciało doskonale czarne przeprowadzono uproszczoną dwupunktową korekcję niejednorodności dla temperatury 25°C oraz 40°C. Uzyskane efekty przedstawiono na rys. 9.

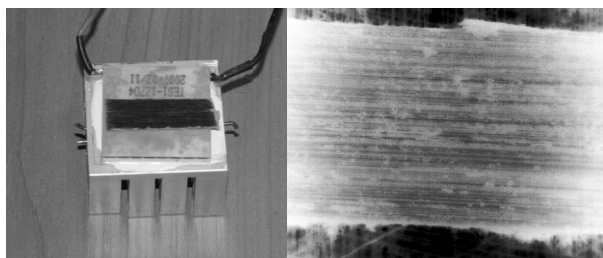
Dwupunktowa korekcja niejednorodności dla kamery z pierścieniem pośrednim pozwoliła uzyskać jednorodny obraz w centralnej części matrycy detektorów, z charakterystycznym winietowaniem na obrzeżach, zależnym od długości zastosowanego pierścienia. Im dłuższy pierścień, tym średnica jednorodnego obszaru była mniejsza. Sam proces korekcji był bardzo wrażliwy na zmiany temperatury pierścienia. Jeśli po korekcji, w trakcie obrazowania ciała doskonale czarnego temperatura pierścienia była inna, niż w trakcie korekcji, było to natychmiast widoczne w postaci odchylenia przebiegu temperatury mierzonej w poprzek powierzchni ciała doskonale czarnego (rys. 9 dla pierścienia 30 mm).



Rys. 9. Efekt korekcji niejednorodności dla kamery z pierścieniem pośrednim (pierścień 60 mm - górny rysunek / pierścień 30 mm - dolny rysunek)

Fig. 9. The results of non-uniformity correction for the camera with an extension ring (60 mm tube - upper figure / 30 mm tube - lower figure)

W celu weryfikacji wpływu temperatury pierścieni pośrednich, temperatury obiektu (równa, niższa lub wyższa od temperatury otoczenia) oraz fabrycznej lub własnej korekcji niejednorodności na jakość obrazowania, przeprowadzono serię badań elementu wykonanego z kompozytu lnianego. Badany kompozyt został umieszczony na ogniwie Peltiera, które umożliwiło jego podgrzanie lub ochłodzenie. W trakcie badań temperatura w pomieszczeniu wynosiła 20°C , a ustabilizowana wewnętrzna temperatura kamery 25°C . Po ustabilizowaniu była to również temperatura pierścienia pośredniego. Dodatkowo, w celu obniżenia temperatury pierścienia poniżej temperatury otoczenia (do 17°C) wykorzystano żel chłodzący 3M Nexcare. Kompozyt obrazowano dla różnych kombinacji temperatury obiektu, pierścienia i korekcji niejednorodności (fabryczna/własna).

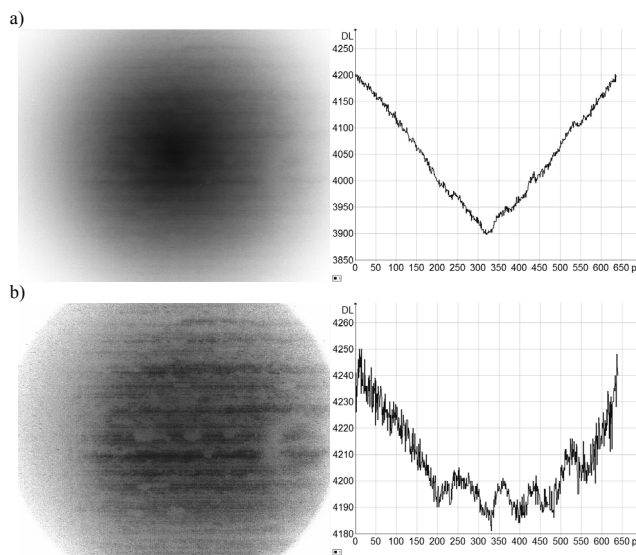


Rys. 10. Badany kompozyt umieszczony na ogniwie Peltiera oraz jego obraz termowizyjny (pierścień 30 mm; obraz uzyskany natychmiast po przykręceniu pierścienia)

Fig. 10. Investigated composite element on a Peltier cell and its thermal image (30 mm extension tube; image acquired immediately after adding the tube)

W każdym przypadku własna korekcja NUC pozwalała uzyskać lepsze wyniki, niż korekcja fabryczna. Poprawę jakości obrazowania kompozytu pozwalało także uzyskać jego nagrzanie do temperatury wyższej o kilka stopni od temperatury pierścienia lub też poprzez ochłodzenie pierścienia poniżej temperatury otoczenia.

Na przykładzie obrazu termowizyjnego kompozytu w temperaturze pokojowej (rys. 11) widać, że własna korekcja niejednorodności pozwoliła uwidocznić 3 wady wewnętrznej struktury badanego kompozytu, które były niewidoczne w przypadku korzystania z korekcji fabrycznej. Równocześnie, wzrost temperatury na krawędzi obrazu, wynoszący ok. 3°C (NUC fabryczny), został zredukowany do około $0,4^{\circ}\text{C}$, przy zastosowaniu własnych współczynników korekcji NUC.



Rys. 11. Obraz termowizyjny kompozytu w temperaturze pokojowej, temperatura pierścienia 25°C ; NUC fabryczny (a), własny NUC (b); 3 niejednorodności struktury pośrodku kompozytu widoczne jako 3 maksima temperatury (b);

Fig. 11. Thermal image at room temperature, extension tube temperature 25°C ; factory NUC (a), custom NUC (b); 3 composite nonuniformities in the middle of the composite visible as 3 temperature maxima (b)

4. Wnioski

Zastosowanie pierścieni pośrednich w pomiarach termowizyjnych pozwala uzyskać duże powiększenia i obrazować elementy o rozmiarach mikroskopowych. Korzystając z pierścieni należy jednak pamiętać o tym, że wpływają one na konfigurację całego układu pomiarowego i same są źródłem dodatkowego promieniowania padającego na matrycę detektorów. Pierścienie można uznać za interesujące narzędzie, ale należy zachować ostrożność w ich zastosowaniu.

Przedstawione w niniejszym artykule wyniki zostały uzyskane w określonych warunkach, za pomocą konkretnego modelu kamery, wyposażonej w określony obiektyw. Należy traktować je jako wskazówkę, opis problemów występujących w przypadku wykorzystywania pierścieni pośrednich w badaniach termowizyjnych. W przypadku innej kamery, innego obiektywu o innej ogniskowej otrzymane wyniki mogą różnić się ilościowo, natomiast same zjawiska zachodzące w takim układzie pomiarowym, a szczególnie problem nagrzewania się pierścieni – szczególnie istotny w przypadku badania obiektów o temperaturze zbliżonej do temperatury otoczenia - będą zawsze obecne i konieczne będzie ich uwzględnienie. Celowe wydaje się również zastosowanie układu chłodzenia i stabilizacji temperatury pierścieni lub też wstępne podgrzanie badanego obiektu powyżej temperatury pierścienia chyba, że badane będą jego właściwości dynamiczne, kiedy znaczenie ma charakter zmian temperatury, a nie ich bezwzględna wartość.

5. Literatura

- [1] Wang H., Dinwiddie R., Graham S.: Applications of IR thermography in capturing thermal transients and other high-speed thermals, SEM Annual Conference Proceeding, 375-378 (1999).
- [2] Kałuża M., Więcek B.: Zastosowanie pierścieni pośrednich w badaniach termowizyjnych, Pomiary, Automatyka, s. 898-901, nr 11, 2009.
- [3] Kałuża M., Wiecek B., De Mey G.: The use of extension tubes in thermography, QIRT 2010 Conference, Québec (Kanada).