

Michał JUREK<sup>1</sup>

## ZASTOSOWANIE TERMOGRAFII AKTYWNEJ W BADANIU STANU POWIERZCHNI ELEMENTÓW STALOWYCH

Powszechność w budownictwie stali, jako materiału konstrukcyjnego, przy jej jednoczesnej podatności na korozję wymusza opracowywanie i stosowanie metod oraz procedur diagnostycznych, pozwalających na możliwie jak najwcześniejsze wykrycie i zlokalizowanie ognisk korozji. Obok szeregu dobrze znanych i skutecznych na tym polu badań metod nieniszczących (ang. Non Destructive Testing, NDT), jak badania ultradźwiękowe, rentgenografia, badania penetracyjne, czy też ocena wizualna, co raz większe uznanie zyskuje termografia aktywna. W pracy przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych, których celem było określenie skuteczności metody termografii aktywnej w detekcji i lokalizacji korozji i innych wad powierzchni elementów stalowych. Przeprowadzono pomiary na próbkach laboratoryjnych w postaci blachy stalowej, o powierzchni zarówno nie malowanej, jak i pokrytej zróżnicowanymi powłokami. Przeanalizowano szereg zaburzenia w postaci korozji, otworu wypełnionego masą szpachlową, wżerów, zabrudzenia klejem epoksydowym. Pomiary wykonano z wykorzystaniem wymuszenia w postaci lampy halogenowej oraz głowicy generującej prądy wirowe. Przeanalizowano zróżnicowane czasy wymuszenia i rejestracji odpowiedzi analizowanych próbek laboratoryjnych. Zarejestrowane sekwencje termogramów podlegały przetwarzaniu poprzez wyznaczenie funkcji aproksymujących o zróżnicowanych parametrach. Uzyskane wyniki przedstawiono w postaci map wartości, określonych współczynników funkcji aproksymujących.

**Słowa kluczowe:** metody nieniszczące, termografia aktywna, konstrukcje stalowe, korozja

### 1. Wprowadzenie

Zalety stali jako materiału konstrukcyjnego powodują, iż jest ona obecnie jednym z najpopularniejszych budulców stosowanych w nowoczesnych oraz tradycyjnych obiektach inżynierskich. Jednak, obok wielu zalet, najpoważniejszą wadą stali jest podatność na korozję. Problem ten dotyczy zarówno elementów stanowiących konstrukcję nośną, jak i elementów powierzchniowych, z któ-

---

<sup>1</sup> Michał Jurek, Politechnika Rzeszowska, Katedra Mechaniki Konstrukcji, ul. Poznańska 2, 35-959 Rzeszów; tel. 178651622; mjurek@prz.edu.pl

rych wykonywane są pokrycia i obudowy. Pomimo stosowania, często bardzo skutecznych powłok zabezpieczających, problem korozji ciągle stanowi istotne zagadnienie z punktu widzenia zabezpieczenia i ochrony, a także renowacji konstrukcji stalowych [1]. Istotnym jest, aby możliwie na jak najwcześniejszym etapie wykryć i zlokalizować ogniska korozji. Ciągłe najpowszechniejszą metodą oceny stanu powierzchni narażonej na korozję jest inspekcja wizualna. Istnieją jednakże zaawansowane metody badań nieniszczących (ang. Non Destructive Testing, NDT), jak badania ultradźwiękowe, rentgenografia, badania penetracyjne pozwalające na ocenę stanu analizowanej konstrukcji, wykrycie wad i anomalii, w tym również stref skorodowanych.

Opracowanie skutecznej metody diagnostycznej pozwala na dostatecznie szybką reakcję, to jest renowację powłok malarskich lub też naprawę uszkodzeń, np. uzupełnienie ubytków czy wymianę uszkodzonych fragmentów. Istotne jest uzyskanie na podstawie badań informacji, które strefy konstrukcji wymagają ingerencji, gdyż nie zawsze konieczna jest renowacja całej zabezpieczanej powierzchni. W przypadku dużych powierzchni (zbiorniki, rurociągi) podejście takie przynieść może znaczne oszczędności.

Innym aspektem, który podlegać może analizie jest stan powierzchni pokrytej warstwą ochronną oraz sama warstwa ochronna. Ma to znaczenie w przypadku kontroli jakości powłok zabezpieczających, a także w przypadku lokalizacji stref wcześniej naprawianych (uzupełnienia ubytków, wielokrotnie nałożone warstwy farby).

Celem przeprowadzonych badań było sprawdzenie przydatności metody termografii aktywnej w diagnostyce powierzchni płaskich elementów metalowych.

## 2. Termografia aktywna

Jedną z metod diagnostyki konstrukcji, której znaczenie istotnie wzrosło w ostatnim czasie jest termografia aktywna. Szczególnie dużą popularność tej metody można zaobserwować w przypadku konstrukcji kompozytowych [2, 3], szczególnie lotniczych [4], gdzie aspekty bezpieczeństwa konstrukcji odgrywają niezwykle istotną rolę. Znane są również zastosowania tej metody w budownictwie [5, 6].

Można stwierdzić, że termografia jest to technika zajmująca się pomiarem i analizą rozkładu temperatury na powierzchni badanego obiektu. Pomiary te polegają na rejestracji natężenia promieniowania podczerwonego, które jest emitowane przez wszystkie obiekty o temperaturze wyższej od zera bezwzględnego. Wynikiem przeprowadzonego pomiaru jest obraz zwany termogramem, będący mapą odwzorowującą rozkład natężenia promieniowania na powierzchni badanego obiektu. Intensywność emitowanego promieniowania podczerwonego, jest proporcjonalna do temperatury ciała, zatem mierząc ilość emitowanego promieniowania podczerwonego, mierzymy jego temperaturę.

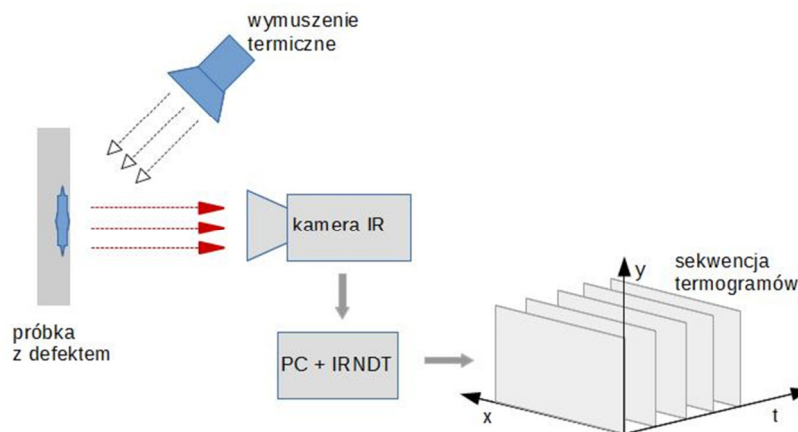
Wyróżnić można dwa zasadnicze podejścia wykorzystujące pomiary promieniowania podczerwonego [7]:

- termografię pasywną – rejestracja naturalnego promieniowania obiektu, bez dodatkowego zewnętrznego źródła ciepła;
- termografię aktywną – rejestracja promieniowania podczerwonego, będącego odpowiedzią analizowanego obiektu na konkretne wymuszenie termiczne.

W typowych zestawach pomiarowych stosowane są następujące źródła ciepła, stanowiące wymuszenie termiczne:

- lampy halogenowe;
- nagrzewnice i dmuchawy ciepłego powietrza;
- lampy błyskowe;
- głowice ultradźwiękowe;
- prądy wirowe, i inne.

Algorytm metody pomiarowej przedstawia Rys. 1. Badany obiekt, znajdujący się w polu widzenia kamery termowizyjnej, poddawany jest oddziaływaniu wymuszenia cieplnego o ściśle określonym charakterze. Odpowiedź analizowanego obiektu w postaci promieniowania podczerwonego rejestrowana jest przez kamerę termowizyjną i przekazywana do komputera wyposażonego w dedykowane oprogramowanie. Rejestracja doświadczenia, w postaci sekwencji termogramów podlega przetwarzaniu, którego efektem są mapy rozkładu określonych parametrów zarejestrowanych sygnałów. Na etapie przetwarzania stosowane są zaawansowane numeryczne metody obróbki sygnałów oraz przetwarzania obrazów.



Rys. 1. Schemat algorytmu termografii aktywnej

Fig. 1. Algorithm of the active thermography method

Jednakże, należy podkreślić, iż oprócz właściwie skonfigurowanego wzajemnego rozmieszczenia poszczególnych elementów układu pomiarowego,

tj. próbki, źródła wymuszenia, kamery termowizyjnej z właściwie dobranym obiektywem, kluczową rolę odgrywa trafny dobór parametrów wymuszenia. Kluczową rolę odgrywa tutaj doświadczenie osoby przeprowadzającej badanie. Należy uwzględnić rodzaj analizowanego materiału, typ, wielkość i rozmieszczenie defektów, których detekcji dotyczy badanie.

Wyróżnić można dwie podstawowe techniki pomiarowe wykorzystywane w termografii aktywnej [8]:

- *pulsed-phased* – wymuszenie stanowią impulsy fali cieplnej, których czas trwania oscyluje od kilku milisekund do kilku sekund;
- *lock-in* – wymuszenie stanowi zmienna, harmoniczna fala cieplna; w analizie uwzględniane są zamiany amplitudy i fazy odpowiedzi.

### 3. Badania laboratoryjne

#### 3.1. Stanowisko pomiarowe

Pomiary laboratoryjne przeprowadzono w Pracowni Diagnostyki Maszyn i Urządzeń Laboratorium Zastosowań Systemów Informatycznych w Diagnostyce, które działa w ramach Laboratorium Badawczego Aeropolis.

W skład stanowiska pomiarowego (Rys. 2) wchodzi:

- kamera termowizyjna FLIR SC 6540 o rozdzielczości 640 x 480 pikseli i zakresie spektralnym 1.5 – 5.1  $\mu\text{m}$ ;
- moduł sterujący wraz ze wzmacniaczem i kontrolerem napięcia;



Rys. 2. Stanowisko pomiarowe

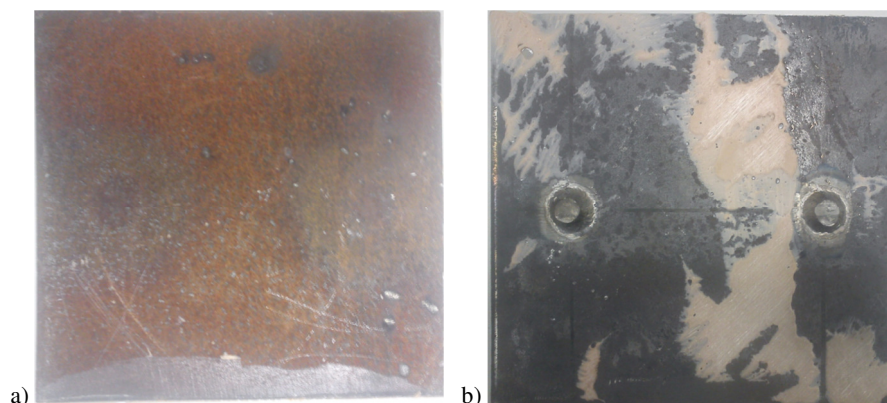
Fig. 2. Laboratory setup

- moduły wzbudzenia:
  - ultradźwiękowego o częstotliwości 15–25 kHz o mocy wyjściowej 2 kW,
  - laserowego
  - generator flash z lampą błyskową o energii błysku 3.0 kJ,
  - lampa halogenowa o mocy 2.5 kW,
  - generator prądów wirowych z głowicą.

W ramach testów wstępnych przetestowano przydatność wszystkich wymienionych źródeł fali termicznej, jednakże w pracy ograniczono się do prezentacji wyników uzyskanych z wykorzystaniem lampy halogenowej oraz generatora prądów wirowych.

### 3.2. Próbki laboratoryjne

W doświadczeniach wykorzystano dwa kwadratowe fragmenty blachy stalowej o wymiarach 250 x 250 oraz 300 x 300 mm i grubości 8 mm. W przypadku mniejszej próbki, analizie poddano stronę umownie określoną jako zewnętrzną, o powierzchni z widoczną gołym okiem korozją, uszkodzeniami w postaci ubytków materiału na powierzchni próbki oraz zabrudzeniem klejem epoksydowym (Rys. 3a). Należy zaznaczyć, że widoczna korozja miała charakter powierzchniowy. Dodatkowo, na wewnętrznej powierzchni próbki znajdowały się krótkie, około 6 milimetrowe fragmenty trzpieni stalowych (Rys. 3b) oraz pozostałości po kleju epoksydowym grubości od 1 do 3 mm.



Rys. 3. Widok próbki laboratoryjnej I: a) strona zewnętrzna – poddana analizie; b) strona wewnętrzna z widocznymi pozostałościami trzpieni stalowych

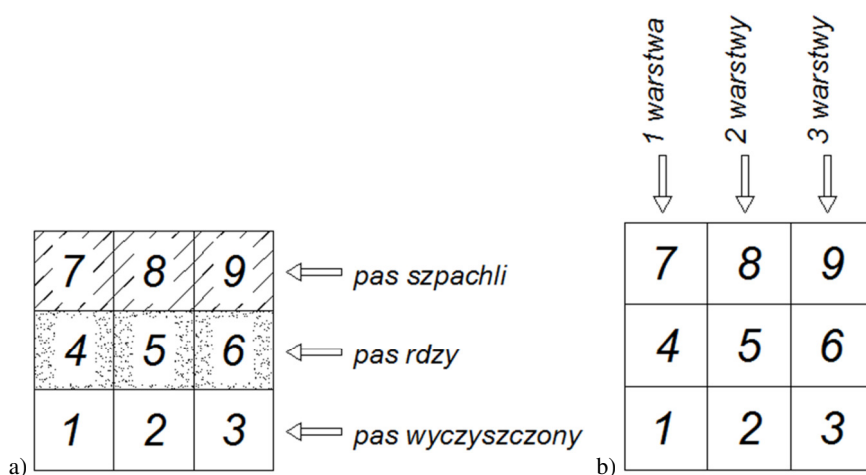
Fig. 3. A view of a laboratory sample I: a) analyzed external side; b) internal side with visible rests of steel bar

Przed przystąpieniem do badań strona zewnętrzna strona próbki pokryta została warstwą czarnego matowego lakieru akrylowego. Miało to na celu ujednolicić emisyjność powierzchni, a także zakryć defekty widoczne ludzkim okiem.

W przypadku próbki II, powierzchnia poddawana analizie została przygotowana w zróżnicowany sposób, wg schematu przedstawionego na Rys. 4. W pierwszym etapie powierzchnia próbki podzielona została na trzy poziome pasy o jednakowej szerokości. Próbkę w części dolnej (Rys. 4.a) została przy pomocy elektronarzędzia dokładnie wyczyszczona, w części środkowej usunięto jedynie zgrubnie luźną warstwę skorodowaną, natomiast części górną próbki pokryto warstwą masy szpachlowej o grubości około 1 mm.

Następnie w drugim etapie (Rys. 4.b) przygotowania, powierzchnię próbki podzielono na trzy pionowe pasy również o jednakowej szerokości. Pas pierwszy patrząc od strony lewej powleczony został jedną warstwą lakieru akrylowego, pas środkowy dwiema warstwami, natomiast pas po stronie lewej pomalowano 3-krotnie.

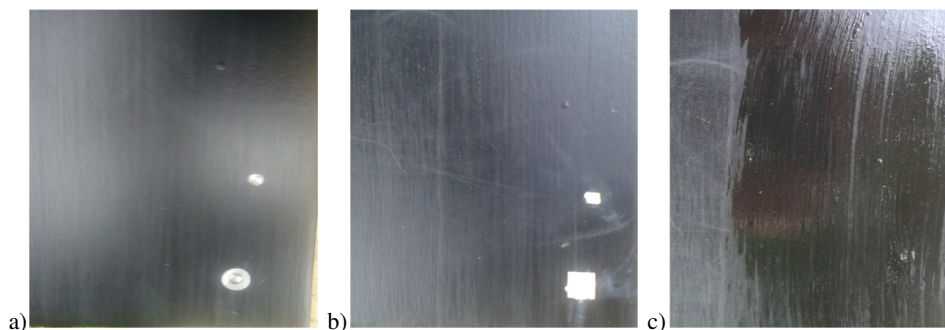
Uzyskana w ten sposób 9 powierzchni zróżnicowanych pod względem sposobu przygotowania powierzchni próbki oraz liczby warstw lakieru.



Rys. 4. Przygotowanie próbki: a) etap I – przygotowanie powierzchni, b) etap II – nakładanie warstw lakieru

Fig. 4. Sample preparation: a) stage I – surface preparation, b) stage II – lacquering

Dodatkowo w prawym dolnym rogu próbki wg schematu z Rys. 4, (pole oznaczonym cyfrą 3) wykonano dwa otwory (Rys. 5.a) – o średnicy 5 i głębokości 3 mm oraz o średnicy 13 i głębokości 6 mm. Następnie otwory zostały wypełnione masą szpachlową (Rys. 5.b) i polakierowane (Rys 5.c).

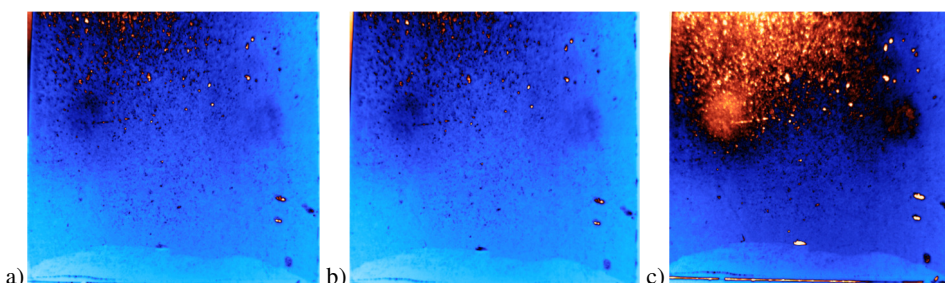


Rys. 5. Etapy wykonania otworów w próbce laboratoryjnej: a) otwory niewypełnione, b) otwory wypełnione masą szpachlową; c) wygląd po ponownym polakierowaniu

Fig. 5. Preparation of holes: a) unfilled holes; b) filled with putty; c) the view after repainting

### 3.3. Wyniki pomiarów

Zarówno próbkę I jak i II poddano działaniu wymuszenia w postaci fali cieplnej generowanej przez lampę halogenową. Przeprowadzono szereg pomiarów, których celem było dobranie optymalnych parametrów wymuszenia tzn. intensywności, czasu trwania, a także ułożenia źródła ciepła względem analizowanej powierzchni. Uwzględniono ponadto wpływ czasu rejestracji odpowiedzi badanego elementu. Przykładowe rezultaty przedstawiono w postaci map określonych parametrów przetworzonych sygnałów (Rys. 6).



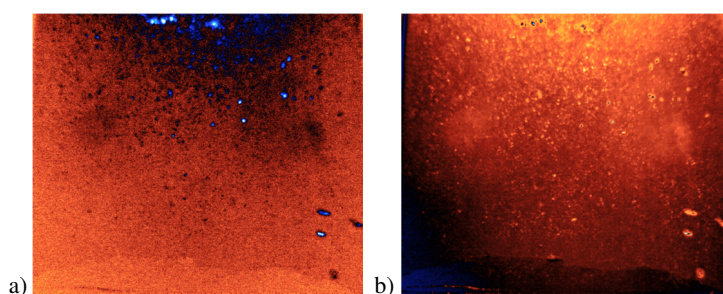
Rys. 6. Próbkę I - mapa wartości współczynników wielomianu aproksymującego dla różnych czasów trwania wymuszenia i rejestracji odpowiedzi odpowiednio: a) 2 i 3 sekundy; b) 6 i 10 sekund; c) 15 i 20 sekund

Fig. 6. Sample I – map of approximation polynomial coefficients for excitation and response measurement time respectively: a) 2 I 3 seconds; b) 6 i 10 seconds; c) 15 I 20 seconds

Można zauważyć, iż niezależnie od czasu trwania wymuszenia oraz czasu rejestracji odpowiedzi próbki widoczne są zarówno zaburzenia powierzchniowe, to jest ubytki materiału na powierzchni próbki, jak i zabrudzenie klejem (w dolnej części próbki). Ponadto widoczna jest lokalizacja zamontowanych po prze-

ciwnej stronie trzpieni stalowych. O ile w przypadku zaburzeń powierzchniowych wydłużenie czasu badania nie miało wyraźnego wpływu na jego wynik, o tyle w przypadku problemu lokalizacji trzpieni najdłuższy czas nagrzewania i rejestracji pozwolił uzyskać zdecydowanie lepszy rezultat.

Pomiary wykonano również dla innych rodzajów technik termografii aktywnej, tj. *pulsed-phase* oraz *lock-in*. Wybrane wyniki przedstawiają mapy na Rys. 7. Również w tym przypadku możliwe jest wskazanie lokalizacji defektów powierzchniowych. Mniej widoczne są natomiast strefy odpowiadające lokalizacji pozostałościom trzpieni.

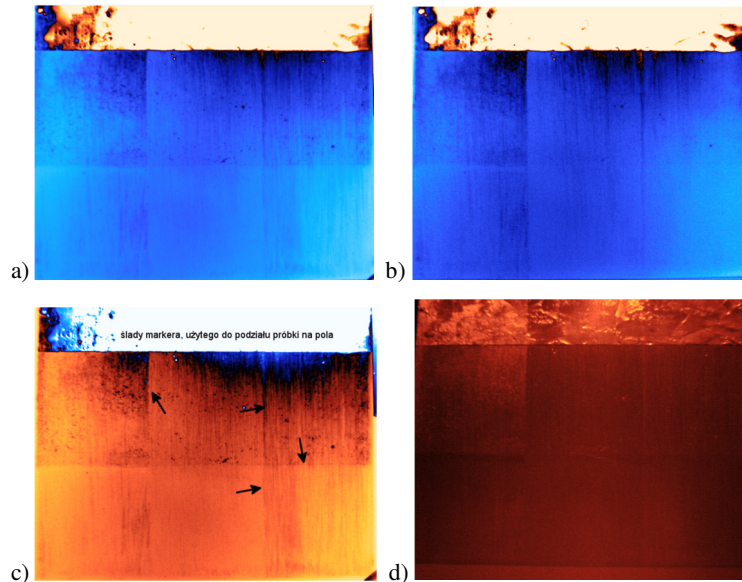


Rys. 7. Próbką I: a) mapa wartości współczynnika wielomianu aproksymującego st. 3, wymuszenie metodą *pulsed-phase*; b) mapa wartości amplitudy fali, wymuszenie metodą *lock-in*

Fig. 7. Sample I: a) map of approximation 3 rd degree polynomial coefficient, excitation *pulsed-phase* method; b) map of wave amplitude value, excitation *lock-in* method

Rezultaty uzyskane w wyniku analizy próbki II przedstawia Rys. 8. W pierwszym etapie celem badań było uzyskanie informacji dotyczących stanu powłoki malarskiej – sposobu przygotowania podłoża (oczyszczone, nieoczyszczone, pokryte masą szpachlową) oraz liczby warstw (1, 2, 3 warstwy).

Uzyskane wizualizacje pozwalają stwierdzić, że na podstawie odpowiedzi termicznej próbki, możliwa jest ocena stanu jej powierzchni. Bezspornie, wskazanie obszaru pokrytego masą szpachlową nie stanowi problemu. Trudniej jest natomiast zróżnicować obszary próbki z oczyszczoną i nieoczyszczoną powierzchnią, jest to jednak możliwe. Również rozróżnienie pomiędzy powierzchnią z pojedynczą warstwą lakieru (lewy pas próbki) jest jak najbardziej możliwe. Natomiast bardzo trudnym jest rozdzielenie powierzchni z podwójną i potrójną warstwą lakieru.

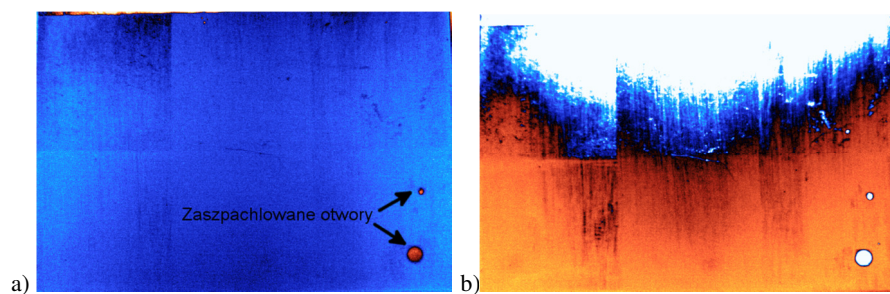


Rys. 8. Próbkę II: mapa wartości współczynnika wielomianu aproksymującego: a) st. 3; b) st. 4; c) mapa wartości drugiej pochodnej w wybranej chwili czasu; d) mapa wartości amplitudy fali, wymuszenie metodą lock-in

Fig. 8. Sample I: a) map of approximation 3 rd degree polynomial coefficient, excitation pulsed-phase method; b) map of wave amplitude value, excitation lock-in method

W drugim etapie badań próbki II podjęto próbę zlokalizowania wcześniej przygotowanych otworów (Rys. 5). W tym celu zastosowano wymuszenie termiczne w postaci fali cieplnej generowanej przez lampę halogenową.

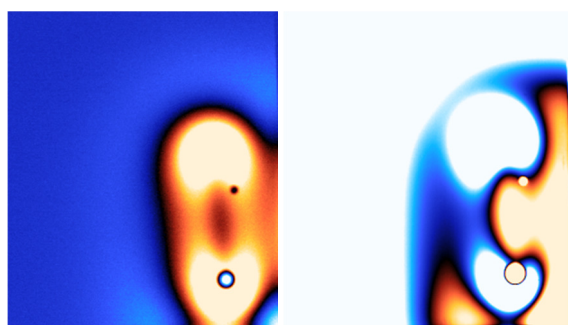
Jak widać na Rys. 9, wskazanie położenia otworów niewidocznych gołym okiem nie stanowi większego problemu. Oczywiście mając na uwadze znaczne różnice w charakterystykach termicznych stali i masy szpachlowej, jest wynik, którego można było się spodziewać.



Rys. 9. Lokalizacja otworów: a) mapa współczynników wielomianu aproksymującego st.3; b) mapa wartości amplitudy fali, wymuszenie metoda lock-in

Fig. 9. Holes localization: a) map of approximation 3 rd degree polynomial coefficient; b) map of wave amplitude value, excitation lock-in method

W kolejnym doświadczeniu fala cieplna wzbudzona została przy użyciu generatora prądów wirowych. Odpowiedzi zarejestrowane na różnych etapach doświadczenia próbki pokazano na Rys. 10. Podobnie jak, w poprzednim teście, wskazanie lokalizacji otworów nie stanowi problemu. Zgodnie z oczekiwaniami, w przeciwieństwie do stalowej blachy, oddziaływanie prądów wirowych na masę szpachlową nie spowodowało powstania ciepła.



Rys. 10. Lokalizacja otworów, odpowiedź próbki na wzbudzenie prądami wirowymi (różne etapy badania)

Fig. 10. Holes localization, sample response to eddy currents excitation (various measurement stages)

#### 4. Wnioski

Przeprowadzone badania laboratoryjne potwierdziły skuteczność termografii aktywnej w analizie stanu powierzchni elementów stalowych. Możliwe jest, nie tylko wskazanie obszarów z występującą pod powłoką malarską korozją, lecz również uzyskanie informacji na temat grubości samej powłoki. Należy zauważyć, iż analizowana próbka charakteryzowała się niewielkim stopniem korozji, można zatem wnioskować, iż wykrycie poważnie skorodowanych stref konstrukcji nie powinno stanowić problemu.

Trzeba jednak zwrócić uwagę na pewne trudności, dotyczące właściwego doboru techniki oraz parametrów wymuszenia. Uzyskanie wiarygodnej diagnozy wymaga doświadczenia w pomiarach i analizach materiałów i defektów określonego rodzaju.

Zastosowana metoda pomiarowa stanowi alternatywę dla technik wykorzystywanych dotychczas w badaniach elementów stalowych i może być z sukcesem wykorzystywana w rzeczywistych pomiarach prowadzonych w ramach badań naukowych oraz ekspertyz i raportów komercyjnych.

#### Literatura

- [1] Możaryn, T., Bobryk, H., Wójtowicz, M.: Wymagania techniczne utrzymania konstrukcji stalowych w kontekście ochrony przed korozją, *Materiały Budowlane*, nr 9, 2012, 84-85.

- [2] Majewska K., Mieloszyk M., Ostachowicz W.: Glass fibre composite elements with embedded fibre Bragg grating sensors inspected by thermography techniques, e-journal of NDT, ISSN 1435-4934, 2016.
- [3] Jurek M., Majewska K., Mieloszyk M., Ostachowicz W., Ziemiański L.: Analiza połączenia płyta GFRP – usztywnienie z wykorzystaniem wibrotermografii, Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury – Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture, JCEEA, z. 64 (2/1/2017), pp. 271-280. DOI:10.7862/rb.2017.71.
- [4] Meola C., Carlomagno G. M., Valentino M. and Bonavolontà C.: Non destructive evaluation of impact damage in CFRP with infrared thermography and squid, 2nd International Conference on Buckling and Postbuckling Behaviour of Composite Laminated Shell Structures, 2008, Germany.
- [5] Maierhofer Ch., Arndt R., Röllig M., Rieck C., Walther A., Scheel H., Hillemeier B.: Application of impulse-thermography for non-destructive assessment of concrete structures, Cement and Concrete Composites, vol.28, no. 4, 2006, pp. 393-401.
- [6] Noszczyk P., Nowak H.: Termografia aktywna jako nowoczesna metoda badań elementów żelbetowych, Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury – Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture, JCEEA, z. 63 (3/2016), pp. 279-286. DOI:10.7862/rb.2016.211.
- [7] Vollmer M., Möllman K.-P.: Infrared Thermal Imaging, Wiley-Vch, 2010.
- [8] Uhl T.: Termografia dynamiczna jako narzędzie diagnostyki konstrukcji, Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Budownictwo i Inżynieria Środowiska, z. 45 (243), 2007, pp. 157-171.

## APPLICATION OF ACTIVE THERMOGRAPHY IN STEEL ELEMENT SURFACE TESTING

### Summary

The commonality of steel as a structural material, with its simultaneous corrosion susceptibility, require the development and application of diagnostic methods and procedures to detect and locate corrosion at the earliest stage.. Apart from a number of well known and effective non-destructive testing (NDT) such as ultrasound, penetration method or visual assessment, active thermography is becoming increasingly popular. The paper presents the results of laboratory tests aimed at determining the effectiveness of the active thermography method in the detection and localization of corrosion and other defects in the surface of steel elements. Measurements were made on laboratory specimens in the form of sheet steel, both unpainted and covered with varied coatings. A number of defects in form of corrosion, holes filled, pitting, dirt with epoxy adhesive were analyzed. The measurements were made using the halogen lamp and the eddy currents generator. Varies times of excitation and measurements were analyzed. Recorded sequences of thermograms were processed by assigning approximation functions with different parameters. The obtained results are presented in the form of maps of values, certain approximation coefficients.

**Keywords:** non destructive testing, active thermography, steel structures, corrosion

*Przesłano do redakcji: 20.09.2017 r.*

*Przyjęto do druku: 29.12.2017 r.*