

NAUKI TECHNICZNE

Artur DUCHACZEK*
Zbigniew MAŃKO**

PRÓBA ZASTOSOWANIA TERMOWIZJI W BADANIACH ZMĘCZENIOWYCH DŹWIGARÓW STALOWYCH W MOSTACH WOJSKOWYCH

W pracy przedstawiono wyniki badań dotyczące możliwości zastosowania kamery termowizyjnej do oceny aktualnego stanu technicznego głównych elementów konstrukcji mostów wojskowych. Obiektem badawczym był stalowy dźwigar mostu niskowodnego, który w latach 2006–2007 w laboratorium Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej został poddany badaniom zmęczeniowym w zakresie obciążeń cyklicznych.

Słowa kluczowe: *dźwigar stalowy, mosty wojskowe, termosprężystość, termowizja, badania zmęczeniowe, trwałość materiału*

WSTĘP

Obiekty mostowe, ze względu na swą specyfikę eksploatacyjną, narażone są w wysokim stopniu na wpływy zmiennych obciążeń zmęczeniowych. Z kolei, w mostach wojskowych występuje znacznie więcej połączeń (przegubów) pomiędzy poszczególnymi elementami (modułami) konstrukcyjnymi umożliwiającymi szybki ich montaż (demontaż) w obszarze przeznaczenia (np. przepraw rzecznych). Ponadto luzy montażowe występujące w takich połączeniach zwiększają w dość istotny sposób obciążenia ruchome o charakterze dynamicznym, co powoduje znacznie większą ich podatność na powstawanie pęknięć o charakterze zmęczeniowym.

Zmęczenie występujące w stalowych mostach wojskowych ma inny zakres i charakter oraz jest inaczej liczone niż w przypadku tradycyjnych stałych obiektów

* kpt. mgr inż. Artur DUCHACZEK – Wydział Zarządzania Wyższej Szkoły Oficerskiej Wojsk Lądowych

** dr hab. inż. Zbigniew MAŃKO – Wydział Inżynierii Kształtowania Środowiska i Geodezji Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu

cywilnych. Wojskowe obiekty mostowe charakteryzują się przede wszystkim wytrzymałością zmęczeniową przy stosunkowo małej liczbie cykli obciążeń, która zwana jest także wytrzymałością zmęczeniową krótkotrwałą (niskocyklową). Z nazwą tą nie należy kojarzyć w żadnym przypadku krótkiego okresu trwałości konstrukcji przęseł (mostów) lub ich elementów konstrukcyjnych. Chodzi w tym przypadku tylko o stosunkowo małą liczbę cykli obciążeń, ale za to przy wysokich poziomach obciążeń roboczych.

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań dotyczące możliwości zastosowania, w niektórych sytuacjach pomiarowych, kamery termowizyjnej służącej do oceny aktualnego stanu technicznego i poziomu wyężenia głównych elementów konstrukcyjnych występujących w mostach wojskowych. Obiektem badawczym był stalowy dźwigar mostu niskowodnego, który w latach 2006–2007 został poddany badaniom zmęczeniowym w laboratorium Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej [1].

Za wykorzystaniem termowizji podczas dokonywania nawet rutynowych przeglądów okresowych obiektów mostowych przemawia stosunkowo niewielki koszt wykonywania takich badań oraz fakt, że jest to metoda niewymagająca wielu dodatkowych czynności przygotowawczych, a analizie można poddać całą konstrukcję przęsa, bez wykonywania trudnych do przeprowadzenia czynności demontażowych.

1. PODSTAWY TEORETYCZNE STOSOWANIA TERMOWIZJI

Znaczna część materiałów konstrukcyjnych, a w szczególności niemal każdy metal podczas procesu obciążania odkształca się najpierw sprężysto (tzn. po ustaniu działania obciążania powraca on do pierwotnego kształtu i to odwracalnie), a następnie przy wzroście obciążenia odkształca się plastycznie (tzn. odkształcenia nie powracają już do stanu pierwotnego po usunięciu obciążenia, a więc powstają odkształcenia trwałe) [2].

Doświadczalne wyznaczenie granicy między tymi dwoma odkształceniami w elemencie konstrukcyjnym jest dość trudne i to na ogół niejednoznaczne ze względu na stosowane techniki pomiarowe. W praktyce inżynierskiej do wyznaczania tej granicy wykorzystuje się dość często pomiary wielkości makroskopowych takich jak: charakterystyki mechaniczne materiału, z którego wykonany został badany element konstrukcyjny, natężenie emisji akustycznej, a ostatnio zmiany emisji strumienia energii wywołanej zmianami temperatury analizowanej próbki.

Zmianę temperatury próbki podczas sprężystego jej odkształcania, przeprowadzoną w warunkach adiabatycznych wyrażaną w [°K], określa zależność podana wzorem (1) [3–5]:

$$\Delta T_s = \frac{-\alpha T \Delta \sigma_s}{\rho C_p}, \quad (1)$$

w którym:

α – współczynnik rozszerzalności liniowej materiału (w tym przypadku stali) [K⁻¹],

T – temperatura absolutna [K],

$\Delta \sigma_s$ – zmiana wielkości naprężenia normalnego w badanym elemencie mostu [MPa],

ρ – gęstość materiału [kg/m³],

C_p – ciepło właściwe materiału (w tym przypadku stali) [J/kgK].

Przyjmując, że w analizowanym zakresie obciążeń odpowiednie współczynniki materiałowe elementu konstrukcyjnego, a więc $\alpha = \text{const.}$, $\rho = \text{const.}$ oraz $C_p = \text{const.}$, otrzykuje się zależność na zmianę jego temperatury w postaci (2):

$$\Delta T_s = -kT\Delta\sigma_s, \quad (2)$$

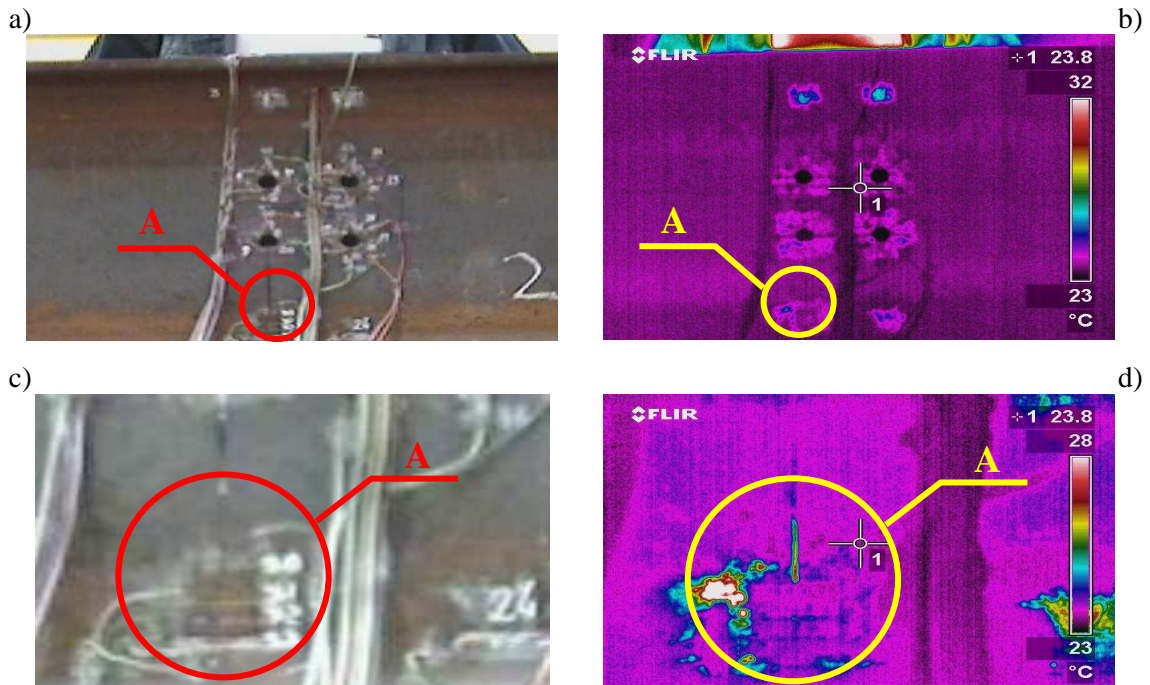
gdzie:

$$k = \frac{\alpha}{\rho C_p}. \quad (3)$$

Oznacza to, że odkształcenie sprężyste (związane z czysto objętościową deformacją próbki metalu) charakteryzuje się liniową zależnością między temperaturą a naprężeniem [2]. Odkształceniu plastycznemu związanemu ze zmianami mikrostruktury próbki (dyslokacją) zazwyczaj towarzyszy wzrost temperatury.

2. PRZYKŁAD PRAKTYCZNEGO ZASTOSOWANIA TERMOWIZJI

Omawiane wyżej właściwości spróbowano wykorzystać w analizie termograficznej kształtownika stalowego, stosowanego powszechnie jako dźwigary główne w budowie mostów wojskowych (np. niskowodnych), poddanego cyklicznie zmiennemu obciążeniu zmęczeniowemu. Analiza wyników przedstawionych w pracach poświęconych badaniom termalnym w stykach montażowych na śruby sprężające blachownic stalowych [2], [6] pozwalała sądzić, że w trakcie prowadzonych badań doświadczalnych na tym dźwigarze będzie można zaobserwować zmiany temperaturowe wywołane przyrostem naprężeń sprężystych w analizowanym modelu, spowodowane propagacją istniejącego już pęknięcia zmęczeniowego.



Rys. 1. Widoki oraz obrazy termalne dźwigara stalowego od strony położenia tensometrów elektrooporowych: a) widok dwuteownika z rozmieszczeniem czujników, b) obraz termalny środnika dwuteownika, c) widok obszaru A w środniku oraz d) obraz termalny obszaru A z rys. 1a

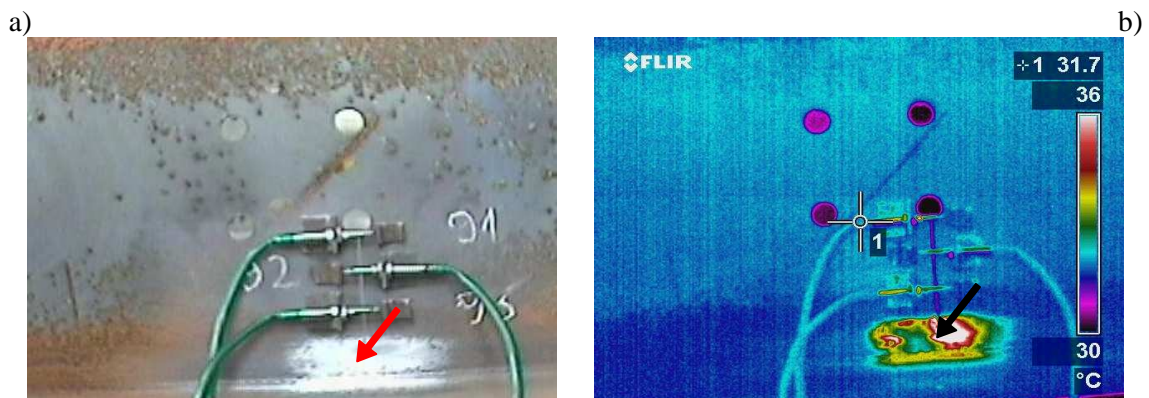
Źródło: Opracowanie własne

Metody termalne zaprezentowane w pracach [2] i [7] wykazywały bowiem dość dużą zgodność otrzymanych rezultatów z wynikami pomiarów tensometrycznych i zastosowaną w obliczeniach metodą elementów skończonych (MES), zwłaszcza w zakresie obciążeń niszczących.

Analizie termograficznej poddano obszar A (rys. 1) położony w rejonie wymuszonego pęknięcia zmęczeniowego, tzn. wykonanego nacięcia w środniku dźwigara stanowiącego koncentrator naprężeń. Niestety badania termalne w tym przypadku były dość znacznie utrudnione z uwagi na fakt, że w przewidywanym obszarze obserwacji środnika znajdowały się także inne urządzenia pomiarowe, takie jak czujniki indukcyjne i tensometry elektrooporowe, niezbędne do realizacji podstawowych celów przeprowadzonych badań. W czasie wykonywania badań dźwigara stalowego temperatura otoczenia w laboratorium wahała się w granicach 23–26°C. Wstępna obserwacja środnika dwuteownika od strony naklejonych tensometrów elektrooporowych wykazała, że ich występowanie zakłóca w dość istotny sposób rozkład widm termalnych, i przez to uniemożliwia prowadzenie obiektywnych obserwacji (rys. 1a,b). Zakłócenia te spowodowane były w głównej mierze występowaniem tensometrów foliowych, które dość skutecznie uniemożliwiały swobodne oddawanie ciepła przez materiał dwuteownika. Również sposób mocowania i przyklejania tych czujników (powierzchniowe oszlifowanie środnika bezpośrednio pod przyklejonymi tensometrami) powodował zmianę rozkładu map termalnych (rys. 1c,d).

Wydaje się jednak, że dokonana obserwacja pracy dwuteownika od strony zainstalowania czujników indukcyjnych dawała wystarczająco zadawalające rezultaty, co pokazano na rys. 2. Na obrazach wykonanych kamerą termowizyjną wierzchołek szczeliny zmęczeniowej (oznaczony strzałką na tym rysunku) wskazywał wyraźny wzrost temperatury w środniku badanego dźwigara. Rejestracja termalna odbywała się na bieżąco w trakcie prowadzenia zasadniczych badań zmęczeniowych tego dźwigara pod obciążeniem cyklicznie (sinusoidalnie) zmiennym.

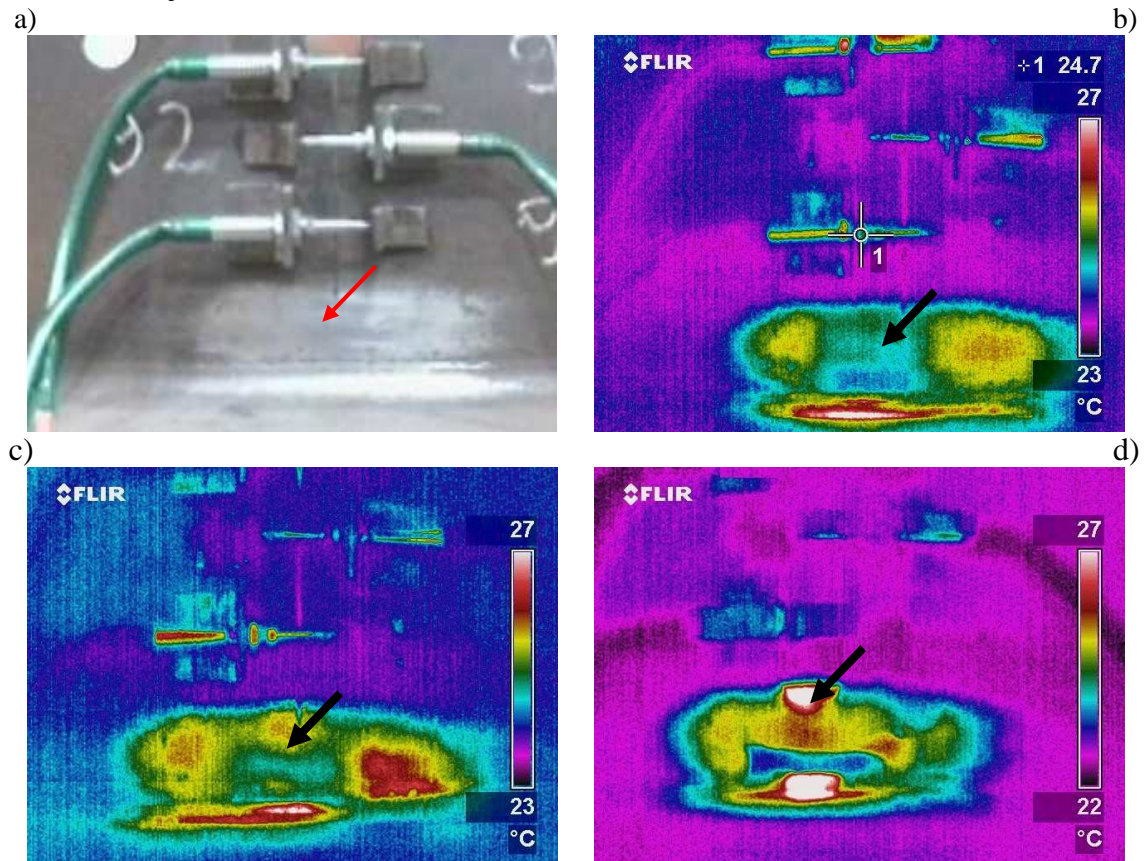
Analizując obraz termalny środnika dźwigara pokazanego na rys. 2 zauważa się również znaczny wpływ zaczynającego się już procesu korozyjnego stali na wskazania kamery termowizyjnej. Pojawiająca się już rdza, znajdująca się na powierzchni dwuteownika, zmniejszyła jego współczynnik refleksyjności.



Rys. 2. Widok oraz obraz termalny dźwigara stalowego od strony umiejscowienia czujników indukcyjnych nr C91, C92 i C93: a) widok środnika dwuteownika b) obraz termalny

Źródło: Opracowanie własne

Na rysunku 3 przedstawiono termogramy obciążonego kształtownika w trakcie wykonywania badań zmęczeniowych dźwigara głównego. Dwuteownik ten poddawany został analizie termalnej po około 2000 cyklach obciążeń w dniu wykonywania zasadniczych badań, a łącznie po zrealizowaniu ponad 10000 cykli obciążeń zmiennych. Pomiary kamerą przeprowadzono przy trzech różnych poziomach obciążenia, tj. 100, 150 i 200 kN [1].

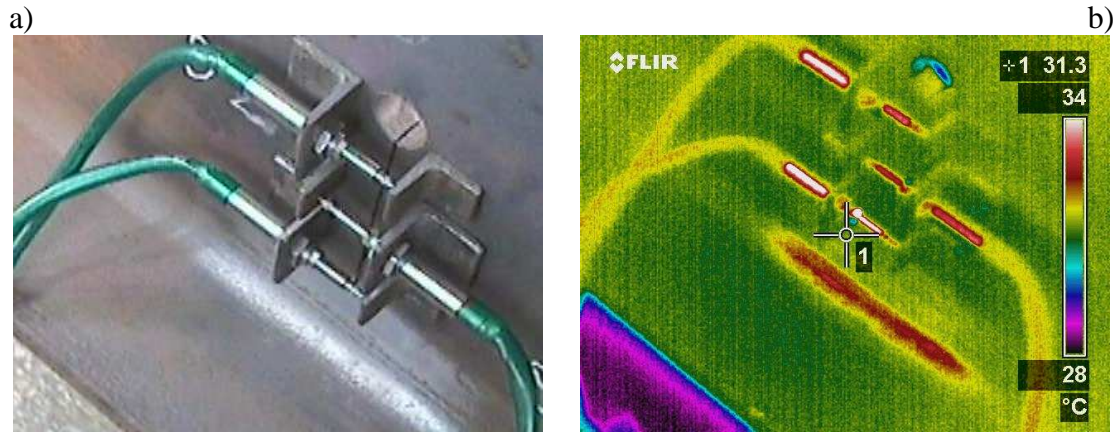


Rys. 3. Widoki: środnika dźwigara wraz z czujnikami indukcyjnymi (a) oraz obrazów termalnych środnika dwuteownika (b, c, d) od strony położenia czujników indukcyjnych pod obciążeniem o wielkości: b) 2×100 kN, c) 2×150 kN, d) 2×200 kN

Źródło: Opracowanie własne

Po analizie zaprezentowanych termogramów środnika dwuteownika (rys. 3) można było stwierdzić, że wraz ze wzrostem przyłożonego do niego obciążenia zewnętrznego, w wierzchołku powstałego pęknięcia zmęczeniowego w dźwigarze stalowym w sposób znaczący nastąpił wzrost jego temperatury.

Analizując obrazy termalne przedstawione na rys. 4 można zaobserwować podwyższenie temperatury rejestrowanej przez kamerę termowizyjną w miejscu występowania czujników indukcyjnych, co mogło być spowodowane zarówno zrealizowanym już programem badań doświadczalnych tego dźwigara, jak i wypolerowaną strukturą jego powierzchni. Na obrazach tych (rys. 4b) widać również wyraźnie, że styk środnik – pas dolny kształtownika jest obszarem, w którym wystąpił znaczny wzrost temperatury.

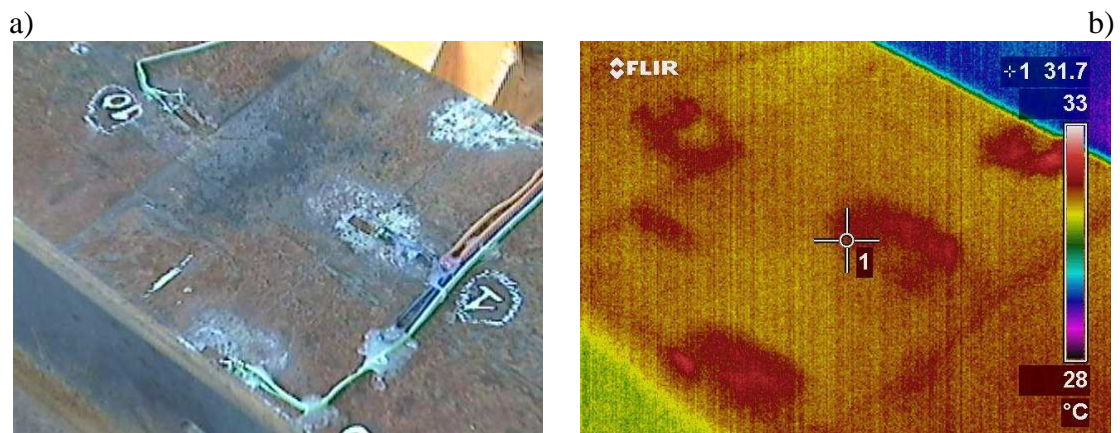


Rys. 4. Widok pęknięcia powstałego w środku dźwigara z ujęcia z góry pod kątem: a) widok dwuteownika z czujnikami indukcyjnymi, b) obraz termalny dwuteownika

Źródło: Opracowanie własne

Mogło być to spowodowane z jednej strony wzrostem odkształceń sprężystych w elemencie konstrukcyjnym podczas przeprowadzonych dotychczas badań zmęczeniowych, a z drugiej zaś strony niezwykle starannym przygotowaniem środnika kształtownika do obserwacji wizualnej poprzez jego przeszlifowanie w tych właśnie miejscach, co spowodowało przypuszczalnie, że promieniowanie ciepłe pochodzące bezpośrednio z otoczenia odbijało się od wypolerowanej powierzchni w znacznie większym stopniu.

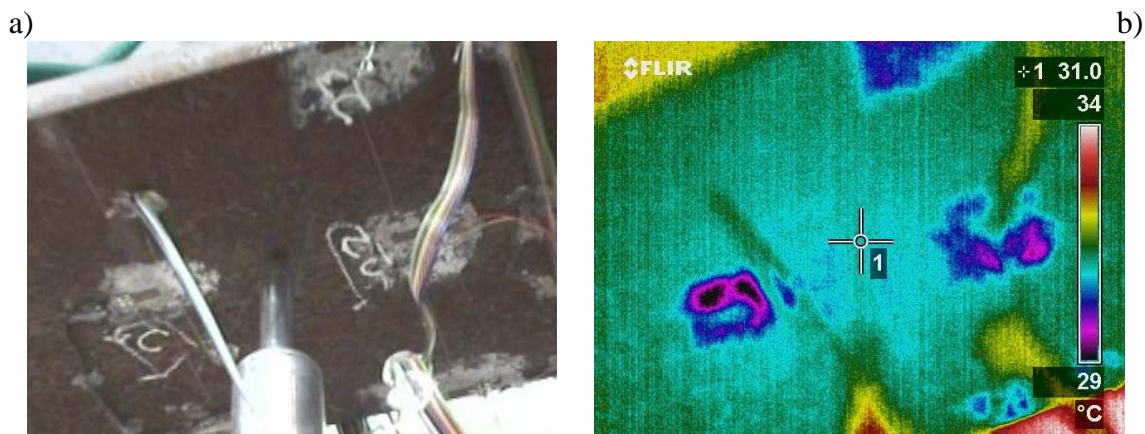
Analiza termalna prowadzona w trakcie badań zmęczeniowych dźwigara stalowego [1] potwierdziła znany już dość powszechnie fakt, że miejsca położone na pasie tego dźwigara (rys. 5), oczyszczone ze śladów rdzy poprzez ich oszlifowanie (miejsca przygotowane pod tensometrię), odbijały część energii cieplnej, przez co wskazywały wyższą temperaturę wewnętrzną elementu. Na niektórych obrazach sytuacja była jednak odwrotna, co zaprezentowano na rys. 6.



Rys. 5. Widok z góry dźwigara stalowego: a) pasa górnego dwuteownika, b) obraz termalny tego pasa

Źródło: Opracowanie własne

Wydaje się, że taka sytuacja mogła zostać spowodowana miejscem lokalizacji dodatkowego źródła światła. Zdaniem autorów pracy wydaje się wysoce prawdopodobne, że lampy oświetleniowe zamocowane nad badanym kształtownikiem, emitując energię cieplną, mogły również przyczynić się do tego, że oszlifowane miejsca położone na górnym pasie dwuteownika błyszcząc powodowały nieco większe odbicia tej energii (rys. 5b), natomiast podczas obserwacji pasa dolnego tego dźwigara efekt ten nie występował już w takim stopniu (rys. 6b).



Rys. 6. Widok i obraz termalny pasa dolnego dwuteownika: a) widok z dołu, b) obraz termalny pasa

Źródło: Opracowanie własne

Badania termograficzne analizowanego dźwigara (przeprowadzone równolegle podczas wykonywania zasadniczych badań doświadczalnych w zakresie obciążeń zmęczeniowych) wskazywały na dość znaczny wzrost jego temperatury już przy naprężeniach wywołanych niewielkim stosunkowo obciążeniem (rzędu 50% obciążenia maksymalnego), co potwierdzało znany już fakt, że badany dwuteownik pracował podczas obciążeń zmęczeniowych stale (ciągle) w zakresie odkształceń sprężystych.

Na podstawie przeprowadzonych badań można było stwierdzić, że istnieje możliwość wykorzystania technik termalnych do analizy stanu odkształcenia i obciążenia oraz pracy (zachowania) elementów stalowych dźwigarów głównych stosowanych w mostach niskowodnych z istniejącym już pęknięciem zmęczeniowym. Wierzchołek powstałej wcześniej szczeliny zmęczeniowej wykazywał bowiem wzrost temperatury, co świadczyło, że proces propagacji pęknięcia odbywał się generalnie w obszarze naprężeń sprężystych, czyli zgodnie z tym jak zakładano w przyjętym programie badań zmęczeniowych [1].

Z. Mańko oraz Z. Kamyk [8] prowadząc analizy termograficzne podczas zrywania próbek wykonanych ze stali w stykach montażowych blachownic na śruby sprężające klasy 10.9 zaobserwowali, że w pewnych przedziałach obciążenia temperatura materiału nie tylko podnosiła się, ale niekiedy również zmniejszała się nieznacznie.

Efekt ten może być również potwierdzeniem znanego z teorii zjawiska, zwanego także efektem Kelvina, polegającego na tym, że metale w warunkach adiabatycznych, poddawane odkształceniom w obszarze sprężystym podczas próby rozciągania ulegają schłodzeniu, natomiast w czasie ściskania ogrzaniu. Wzrost energii wewnętrznej, a tym

samym wzrost temperatury, jest spowodowany zmianami odległości i zniekształceniami występującymi w sieci krystalicznej materiału. Dzięki efektowi Kelvina rejestruje się również moment inicjacji przemiany martenzytycznej w stalach austenitycznych indukowany odkształceniem plastycznym [9].

Należy podkreślić przy tym, że ciała przezierne (np. szyby) odbijają, przepuszczają i pochłaniają energię cieplną pochodzącą z najbliższego otoczenia oraz emitują energię cieplną własną, natomiast ciała nieprzezroczyste (np. ściany murowane, dźwigary stalowe, itp.) odbijają i pochłaniają energię cieplną pochodzącą z najbliższego otoczenia oraz emitują energię cieplną własną. Jedynie energia emitowana przez samo ciało (element) wskazuje na jego właściwą temperaturę, i dlatego też należy bezwarunkowo, w najwyższym możliwym stopniu, ograniczyć wpływ energii pochodzącej z dodatkowych odbić i transmisji.

Dla ciał nieprzezroczystych (dla danej długości fali podczerwieni) można założyć, że transmisja jest równa zero. Błędy pomiarowe powstałe podczas badań spowodowane mogą być również przez energię podczerwieni odbitą, a pochodzącą, np. z różnych źródeł światła i związanego z tym ciepła. Aby wyeliminować ten wpływ określa się tzw. współczynnik emisyjności. Dla przykładu, emisyjność 0,90 oznacza, że 90% energii pochodzi od analizowanego ciała (i wskazuje na jego bezpośrednią temperaturę własną), a pozostałe 10% to skutek zaistniałych odbić.

Ze względu na występujące trudności w dokonywaniu pomiarów termalnych materiałów o niskiej emisyjności, stosowanie kamer termowizyjnych nie jest na ogół zalecane do wykonywania bezpośrednich pomiarów powierzchni błyszczących, polewanych i nieoksydowanych metali, takich jak aluminium, mosiądz, chrom lub stal nierdzewna.

Błyszczące powierzchnie metali charakteryzują się bowiem dużą refleksyjnością (współczynnikiem odbicia), zarówno światła widzialnego jak i promieniowania podczerwonego. Współczynnik ten gwałtownie rośnie wraz z długością fali promieniowania, i dla fal o długości powyżej 5 mm, tj. praktycznie, dla prawie wszystkich metali, wynosi on 0,98. Niemal wszystkie metale (wypolerowane) odbijają około 98% promieniowania pochodzącego z zewnątrz. Obiekty fizyczne – za wyjątkiem tzw. „ciała doskonale czarnego” – nie wysyłają 100% energii charakterystycznej dla danej temperatury. Wielkość wysyłanej energii określona jest tzw. współczynnikiem emisyjności. Dla ciał nieprzezroczystych (a więc wszystkich metali) można przyjąć, że suma współczynnika emisyjności e i współczynnika odbicia r (refleksyjność) daje wartość równą jeden [10].

Dotychczas opracowano już kilka metod minimalizacji wysokich współczynników refleksyjności i ich wpływ na ostateczne wyniki pomiarów [10]. Najprościej można zmatowić analizowane powierzchnie poprzez ich zaoksydowanie w części mierzonej, i tak np. stal zmienia wówczas emisyjność z 0,10 na 0,85, co umożliwia już dokonywanie prawidłowych pomiarów. Często ze względów technologicznych jest to jednak niemożliwe.

Inną z proponowanych metod jest zastosowanie tzw. taśmy pomiarowej, która przyklepiana jest do powierzchni mierzonej. Charakteryzuje się ona właściwą temperaturą pracy, określonym laboratoryjnie współczynnikiem emisyjności oraz

stosunkowo niską opornością termiczną skrośną [10]. Zastosowanie takiej taśmy ograniczone jest maksymalną temperaturą pracy ustaloną na poziomie około 150°C. Bardzo popularną i polecaną metodą eliminacji refleksyjności wypolerowanych metali jest pokrycie ich powierzchni cienką warstwą lakieru (np. z pojemnika aerozolowego). W tym przypadku kolor stosowanego lakieru jest mało istotny, gdyż pomiary odbywają się poza światłem widzialnym, a efektywna emisyjność wzrasta do 0,90. Pewnym ograniczeniem ich stosowania jest tylko maksymalna temperatura pracy popularnych lakierów. Dostępne są specjalne lakiery pracujące nawet w temperaturach do 1200°C.

Najlepszą aktualnie metodą [10] jest zastosowanie specjalnego przyboru pomiarowego, tzw. tuby wziernikowej (*sighting tube*). Przybór ten, dzięki swojej konstrukcji, niemal w 100% eliminuje odbicia promieniowania tła od powierzchni mierzonej, i w ten sposób daje możliwość precyzyjnego pomiaru temperatury wypolerowanych powierzchni stali, aluminium, miedzi, cynku, cyny oraz metali szlachetnych.

PODSUMOWANIE

Aby wnioski zaprezentowane w prezentowanej pracy były w pełni obiektywne, należy w kolejnych badaniach eksperymentalnych odpowiednio przygotować przedmiot badań, tj. kształtownik, w taki sposób, aby miał on całą powierzchnię o jednakowej teksturze, tzn., aby nie było żadnych przeszlifowanych powierzchni powodujących błyszczenie materiału (stali). Dlatego też w niniejszej pracy ograniczono się jedynie do podania kilku ogólnych wniosków o charakterze jakościowym, rezygnując całkowicie z wniosków ilościowych, ponieważ nie było to zasadniczym tematem badań, a miało jedynie na celu sprawdzenie możliwości i zasadności użycia w dalszych badaniach zmęczeniowych kamery termowizyjnej.

Wykorzystując narzędzia termowizji można także podjąć w przyszłości próbę określenia początku rozpoczęcia inicjacji odkształcenia plastycznego w materiale elementu konstrukcyjnego [8], przez co mogą one być wykorzystane do diagnozowania jakości i aktualnego stanu starych dźwigarów stalowych podczas długotrwałej eksploatacji obiektów mostowych.

Termowizja [8] umożliwia także uzyskanie stosunkowo szerokiego obrazu (mapy) odkształceń i naprężeń badanej konstrukcji w porównaniu z tensometrią elektrooporową, która pozwala jedynie na punktowe ustalenie odkształceń bądź naprężeń, co wynika z ograniczonych możliwości rozmieszczania określonej liczby tensometrów elektrooporowych lub czujników indukcyjnych na badanym elemencie mostu.

Stwarza ona także możliwość wyszukiwania nawet przypadkowych lub dotąd nieznanymi miejsc powstania punktów koncentracji naprężeń w elementach konstrukcyjnych, tzn. tam gdzie się ich nikt wcześniej nie spodziewał, co może umożliwić w przyszłości w znacznie szybszy sposób wykrycie miejsc inicjacji pęknięć zmęczeniowych w dźwigarach mostowych [8], a następnie na obserwowanie ich dalszego rozwoju.

Dość często, zdaniem autorów pracy użycie kamery termowizyjnej do oceny aktualnego stanu technicznego głównych elementów konstrukcji mostów

niskowodnych, może okazać się jedyną techniką pomiarową możliwą do praktycznej realizacji, w celu poszukiwania powstałych mikropęknięć.

LITERATURA

- [1] Duchaczek A., Mańko Z., *Wyznaczanie trwałości eksploatacyjnej mostów wojskowych*, Praca naukowo-badawcza, ID/831, Wyższa Szkoła Oficerska Wojsk Lądowych im. gen. Tadeusza Kościuszki we Wrocławiu, Wrocław 2005–2007.
- [2] Mańko Z., Kamyk Z., *Zastosowanie termowizji do oceny pracy styków montażowych na śruby sprężające*, [w:] „Konstrukcje Stalowe” nr 4, 2004, s. 35–37.
- [3] Brémond P., *New Developments in Thermo Elastic Stress Analysis by Infrared Thermography*, IV Conferencia Panamericana de END, Buenos Aires, Octubre 2007 [online]. [dostęp: 12. 10. 2009]. Dostępny w Internecie: <http://www.ndt.net/article/panndt2007/papers/138.pdf>
- [4] Man-Yong Choi, Jung-Hak Park, Ki Soo Kang, Won-Tae Kim, *Application of Thermography to Analysis of Thermal Stress in the NDT for Compact Tensile Specimen*, 12th A-PCNDT 2006 – Asia-Pacific Conference on NDT, Nov. 5–10, 2006, Auckland, New Zealand [online]. [dostęp: 12. 10. 2009]. Dostępny w Internecie: <http://www.ndt.net/article/apcndt2006/papers/p18.pdf>
- [5] Boyce B., Borgarelli N., Brustenga G., Rossi G. L., *The Thermoelasticity Principle in Stresses Distribution Measurements on Automotive Parts*, Department of Industrial Engineering of the University of Perugia, StressPhotonics Inc. Madison, WI (USA) [online]. [dostęp: 14. 10. 2009]. Dostępny w Internecie: http://www-b.unipg.it/misure/data/articles/tsa_auto.pdf
- [6] Pieczyńska E. A., Gadaj S. P., *Zastosowanie bezstykowego pomiaru temperatury do badania wpływu umocnienia na początek odkształcenia plastycznego metalu*, Trzecia Ogólnopolska Konferencja Termografii i Termometrii w Podczerwieni, Warszawa, 27–29 listopada 1996, s. 183–188.
- [7] Pasternak H., Horváth L., *Untersuchung zyklisch beanspruchter Stahlbauteile mit Hilfe der Termovision*, Der Stahlbau, J. 66, 1997, H. 3, S. 127–135.
- [8] Mańko Z., Kamyk Z., *Ocena wytrzymałości zmęczeniowej połączeń ciernych na śruby sprężające w mostach stalowych*, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne (DWE), Wrocław, 2004.
- [9] Maciejewski Ł., Myszka W., *Wirtualne laboratorium mechaniki – eksperyment na odległość, współpraca badawcza i gromadzenie wiedzy* [online]. [dostęp: 15. 10. 2009]. Dostępny w Internecie: <http://www.immt.pwr.wroc.pl>
- [10] [online]. [dostęp: 12. 10. 2009]. Dostępny w Internecie: <http://www.termowizja.biz>.

**ATTEMPT TO APPLY THERMAL VISION IN FATIGUE TESTS OF
MILITARY BRIDGE STEEL GIRDERS**

Summary

The paper presents the results of research pertaining to a potential application in certain measurement situations of a thermal vision camera to assess the current technical condition of major military bridge structural components. The research was conducted on a low-level bridge steel girder that was subject to fatigue tests in respect of cycle loads in the laboratory of the Institute of Building Engineering of Wrocław University of Technology in the years 2006 and 2007.

Key words: *steel girder, military bridges, thermoelasticity, thermal vision, fatigue tests, material durability*

Artykuł recenzował: dr hab. inż. Jerzy CZMOCHOWSKI