



METODIKA PRO TERMOGRAFIKÉ MĚŘENÍ OBJEKTŮ DOPRAVNÍ INFRASTRUKTURY METHODOLOGY FOR THERMOGRAPHIC MEASUREMENT OF TRANSPORT INFRASTRUCTURE OBJECTS

Michal JANKŮ*, Josef STRYK*

* Centrum dopravního výzkumu, v.v.i.

michal.janku@cdv.cz

Abstrakt

V roce 2016 byla v Centru dopravního výzkumu, v.v.i. (CDV) vytvořena metodika pro termografické měření objektů dopravní infrastruktury. Metodika popisuje použití termografické metody při diagnostice mostů, pozemních komunikací a tunelů. V případě mostů se měření provádí standardní ruční termokamerou, u vyšších nebo špatně přístupných staveb ji lze osadit na dron. Při termografickém snímání pozemních komunikací a tunelů je výhodné připevnit termokameru na měřící vozidlo. Termografie jako nedestruktivní diagnostická metoda mimo jiné umožňuje odhalit skryté vady pod povrchem konstrukce. Odlišné teploty na povrchu konstrukce mohou být důsledkem poškození pod povrchem a zobrazují se jako teplotní anomálie na zaznamenaném termosnímku. Tuto technologii lze využít k určení oblastí, na které je potřeba zacílit podrobnou (lokální) diagnostiku. Hlavní výhodou této metody je její rychlost a jednoduchost, kdy lze měření provádět i bez přímého přístupu ke konstrukci a bez nutnosti vyloučení provozu. Naopak některé druhy měření je možné provádět pouze za určitého počasí a denní doby. Metodika definuje nejvhodnější podmínky pro měření. V neposlední řadě se metodika pokouší varovat před možnými chybami, kterých se lze dopustit špatným postupem při měření nebo nevhodnou obsluhou termokamery.

Klíčová slova: metodika, termografie, měřící vozidlo, most, pozemní komunikace, tunel

Abstract

In 2016, CDV - Transport Research Centre created a methodology for thermographic measurement of transport infrastructure objects. The methodology describes the use of a thermographic method for diagnosing bridges, roads and tunnels. In the case of bridges, the measurements are performed by a standard handheld thermocamera, for higher or poorly accessible constructions it can be mounted on a dron. In the case of thermal imaging of roads and tunnels, it is advantageous to place the thermal camera on the measuring vehicle. Thermography as a non-destructive diagnostic method also makes it possible to detect hidden defects under the surface of the structure. Different temperatures on the surface of the structure may result from damage under the surface and appear as a thermal anomaly

on the thermal picture. This technology can be used to identify areas where the detailed local diagnostics should be carried out. The main advantage of this method is its high speed and simplicity, where measurements can be made without direct access to the structure and without the need to exclude traffic. Conversely, some types of measurements can only be performed under certain weather and weather conditions. The methodology characterizes the most suitable conditions for measurement. Last but not least, the methodology attempts to warn against possible mistakes that may be caused by the wrong method of measurement or inappropriate operation of the thermal camera.

Key words: methodology, thermography, measuring vehicle, bridge, road, tunnel

1. Úvod

Infračervená termografie je analytická technika založená na detekci záření objektů v IR spektru vlnových délek. Takto září všechna tělesa, jejichž teplota je vyšší než absolutní nula. Zařízení, které detekuje a skládá 2D obraz IR záření se obecně nazývá IR kamera nebo termografická kamera, zkráceně termokamera. Výsledkem záznamu termokamery je obraz odpovídající intenzitě tepelného vyzařování snímaného objektu. Tento záznam se nazývá termogram. Intenzita tepelného záření objektů přitom přímo souvisí s jejich teplotou.

Termografie se dělí na kvalitativní nebo kvantitativní a pasivní nebo aktivní. Cílem kvantitativní termografie je přesné stanovení hodnot teploty měřených objektů nebo jejich částí. V tomto případě je nezbytná znalost optických vlastností měřených objektů, často v závislosti na teplotě a je potřeba hodnotit vliv okolí na měřené hodnoty.

Kvalitativní termografie obecně nevyžaduje přesné měření teplot v absolutních hodnotách. Vyhodnocují se zejména teplotní rozdíly a kontrasty v IR vyzařování mezi různými místy jednoho měřeného objektu. Pro potřeby diagnostiky staveb dopravní infrastruktury se používá právě kvalitativní termografie.

Oba přístupy, kvalitativní i kvantitativní, mohou být aplikovány ve smyslu pasivní nebo aktivní termografie. Na měřený objekt může být uměle aplikováno vybuzení externím zdrojem, které způsobí vznik teplotních kontrastů spojených s materiálovými nehomogenitami nebo výskytem vad v materiálu. V takovém případě se jedná o aktivní termografii.

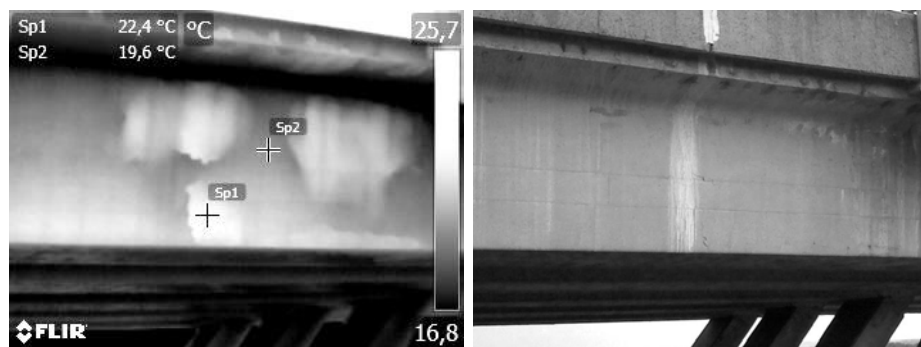
Pokud se při měření uměle neovlivňuje teplota objektu a měří se tedy její přirozená teplota nebo přirozeně vzniklé teplotní kontrasty, jedná se o pasivní termografii. Vzhledem k velikostem staveb dopravní infrastruktury nepřichází aktivní termografie ve většině případů v úvahu, a proto se při měření těchto objektů uplatňuje právě pasivní termografie.

2. Poruchy, které lze zaznamenat termokamerou

IR termografii lze za vhodných podmínek výhodně použít při zjišťování plošných poruch tzv. delaminací na betonových konstrukcích. Tyto poruchy jsou často způsobeny korozí betonářské výztuže. Korozi výztuže obvykle předchází karbonatace betonové krycí vrstvy. V průběhu času do betonu se vzduchem proniká CO_2 a reaguje s $\text{Ca}(\text{OH})_2$ – portlanditem, obsaženým v betonu. $\text{Ca}(\text{OH})_2$ se rozkládá na CaCO_3 a vodu. Jak postupuje CO_2 do betonu, ubývá $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a tím se snižuje pH krycí vrstvy.

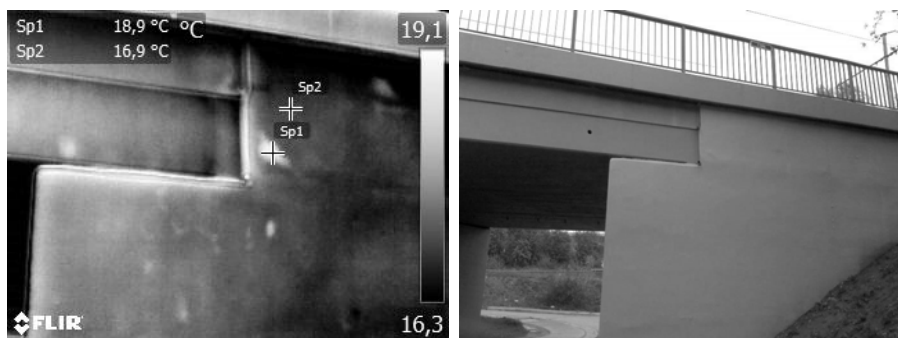
Když pH betonu klesne pod hodnotu 9, rozpadne se vrstvička hutných oxidů železa mezi ocelí a betonem. Dojde k tzv. depasivaci výztuže. Tímto okamžikem má k výztuži přístup voda a kyslík a startuje koroze výztuže.

Čím je menší hloubka uložení výztuže pod betonovým povrchem, tím dříve hrozí vznik koroze v případě, že je betonový povrch vystaven nepříznivým vlivům. Korozní produkty mají podstatně větší objem než původní kov. Jejich tvorba má za následek zvýšený tlak na betonovou krycí vrstvu. S přibýváním korozních produktů se tento tlak zvyšuje až do oddělení (delaminaci) betonové vrstvy od armatury a vzniku dutiny. Následně může dojít až k úplnému odtržení částí betonu. V případě, že se pod mostem nachází jiná komunikace, hrozí riziko poškození projíždějícího vozidla nebo v horším případě poranění osob při zasažení odtrženým kusem betonu. Na obrázku 1 vlevo je termogram betonového nosníku mostu, vpravo pak je fotografie téhož místa.



Obr. 1 Delaminace krycí betonové vrstvy na nosníku betonového mostu

Fig. 1 Delamination of the cover concrete layer on the concrete bridge beam

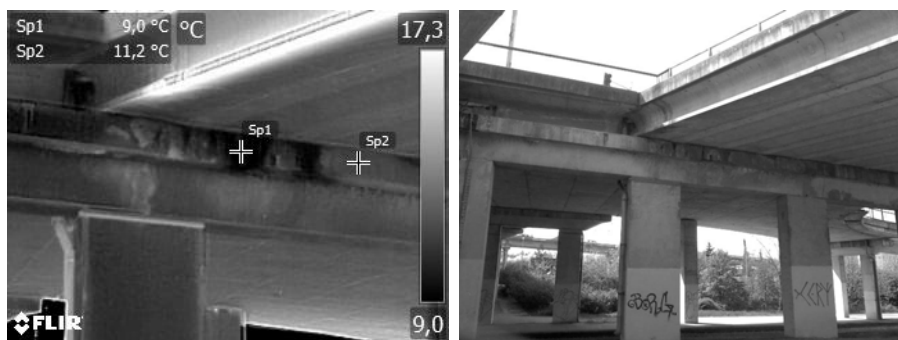


Obr. 2 Sanační nátěr na křídle opěry oddělený od podkladu; světlá – teplejší barva

Fig. 2 Remediation coating on the wing of the support, separated from the substrate; light - warmer color

Delaminace povrchové vrstvy nemusí být způsobena jen korozí výztuže. Na obr. 2 je termosnímek křídla opěry mostu, na kterém byl proveden sanační nátěr. Více zahřáté oblasti označují místa, ve kterých se tento nátěr odděluje od podkladu.

Další možností aplikace termografické metody je zjišťování přítomnosti vody v konstrukci. Při měření se vychází ze skutečnosti, že kapalina při vypařování odebírá teplo svému okolí. Pomocí termokamery tak lze odhalit oblasti s přítomností vlhkosti, která nemusí být pouhým okem na první pohled zřejmá. Na obr. 3 je patrný zátok na úložný práh podpěry pravděpodobně způsobený porušeným dilatačním závěrem mostu.



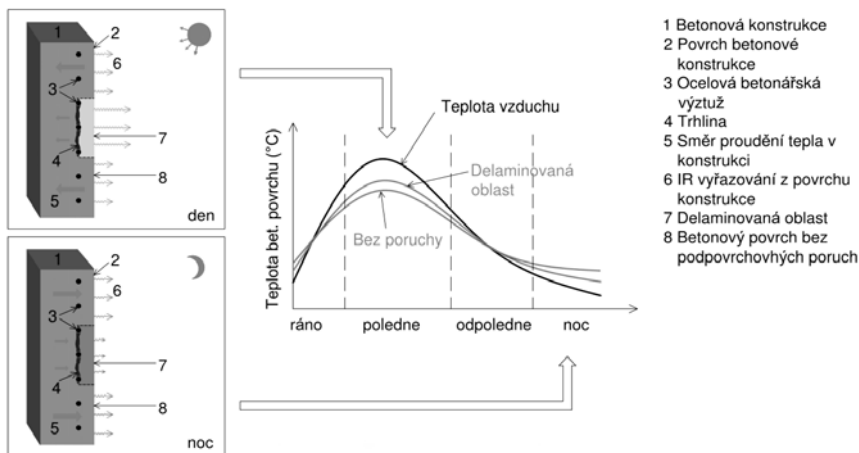
Obr. 3 Zátok na úložný práh; tmavá – chladnější barva

Fig. 3 Leak on the storage threshold; dark - cooler color

3. Princip zjišťování delaminací a dutin

Rychlost, jakou se teplo šíří v konstrukci, závisí na tepelné vodivosti. Ta je přímo úměrná teplotnímu rozdílu (ΔT) mezi místy přenosu tepla. Během dne dochází

obvykle ke kolísání mezi denní a noční teplotou. Na tyto změny reaguje i konstrukce. Vlivem dopadajícího slunečního záření a vzrůstající okolní teplotě se nejprve otepluje povrch objektu, od kterého se teplo šíří hlouběji do konstrukce. Pokud naopak dojde ke snížení okolní teploty (v noci), konstrukce se ochlazuje a teplo se šíří opačným směrem.



Obr. 4 Princip zjišťování skrytých poruch pomocí termografické metody

Fig. 4 The principle of detection of hidden faults using a thermographic method

V případě, že se pod povrchem konstrukce nachází nějaká porucha (delaminace) nebo dutina, působí vzduch zde obsažený jako „izolace“, která omezuje proudění tepla. Tato porucha způsobuje, že se povrch nad ní zahřívá více než obdobný povrch konstrukce bez závad. Důvodem je omezení odvodu tepla z povrchu do hloubky konstrukce (obr. 4). Při ohřívání konstrukce lze proto očekávat, že oblasti nad poruchou budou teplejší než okolní nepoškozený beton - vzniká tzv. pozitivní teplotní kontrast. Při ochlazování konstrukce nastává opak, kdy v těchto místech dochází k rychlejšímu odvodu tepla, a proto se budou tyto oblasti na pořízených termogramech jevit jako chladnější - negativní teplotní kontrast. Tohoto jevu lze využít například při termografické diagnostice mostů a vyhledávání delaminací.

4. Způsoby termografického snímání

Volba vhodného způsobu měření a typu přístroje musí vždy vycházet z účelu měření, požadované přesnosti a místních podmínek. Běžná ruční termokamera se hodí například pro termografické snímání většiny mostů. Tyto termokamery nemají na rozdíl od digitálních fotoaparátů optický zoom, proto je potřeba si vystačit se

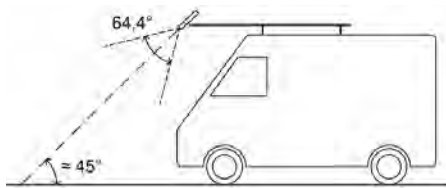
základním objektivem. Některé modely umožňují použití různých typů objektivů. Při měření na větší vzdálenosti tak lze použít teleobjektiv. Naopak pro měření na krátké vzdálenosti je výhodný širokouhlý objektiv. V případě potřeby snímání špatně dostupných staveb, lze termokameru osadit na dálkově řízený dron.

Pro termografické snímání liniových staveb jako jsou vozovky nebo tunely, je výhodné upevnit termokameru na měřicí vozidlo. Při tomto měření se používá průmyslový typ termokamery, který zpravidla nemá vlastní displej, ale je propojen s počítačem, na jehož displeji jsou záběry zobrazovány. Na vozidle může být zároveň umístěna digitální kamera a jednotka GPS. Data ze všech těchto zařízení jsou synchronizována a ukládána do paměti přenosného počítače ve vozidle. Na obrázku 5 je měřicí vozidlo Centra dopravního výzkumu, které bylo využito pro termografické snímání vozovek.



Obr. 5. Měřicí vozidlo s kamerami

Fig. 5 Measuring vehicle with cameras



Obr 6. Náčres měřicího vozidla

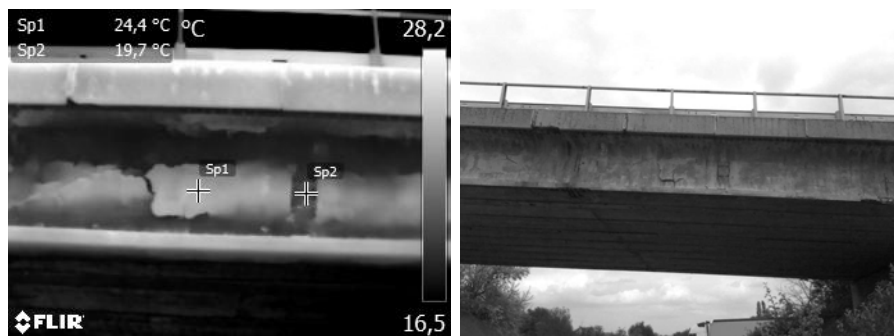
Fig. 6. Sketch of measuring vehicle

5. Měření na mostech

Poruchy pod povrchem betonových konstrukcí představují výzvu pro pracovníky provádějící jejich kontrolu či údržbu. Koroze podpovrchové výztuže může způsobit delaminaci a následné odprýskávání kusů betonu. V krajním případě mohou tyto odpadávající betonové kusy ohrozit provoz pod narušeným mostem. K udržení bezpečnosti provozu a omezení rizik spojených se stavebně technickým stavem mostů jsou prováděny pravidelné prohlídky. Tyto kontroly se obvykle skládají z vizuálního posouzení stavu mostu. Delaminace způsobené korozí betonářské výztuže nejsou vizuálně pozorovatelné, dokud poškození nepokročí do té míry, že nastane odprýskávání betonu. Pro detekci tohoto poškození v jeho rané fázi, kdy lze ještě provést cenově efektivní opravy, je potřeba progresivních diagnostických metod.

Infračervená termografie umožňuje detekovat skryté vady na základě vyhodnocení teplotních odchylek napříč betonovým povrchem. Když se teplota materiálu zvyšuje, jako například během dne, kdy slunce a okolní vzduch zahřívají betonový povrch, je oblast nad delaminací teplejší, než okolní nepoškozený beton. Během noci, kdy teplota vzduchu klesá, se naopak tyto oblasti ochlazují rychleji, a proto se na termogramech jeví jako chladnější.

Části konstrukce, na které dopadá sluneční záření, se pochopitelně zahřívají rychleji, než ty, které se nachází ve stínu. Doporučuje se provádět inspekce ve dnech, kdy je nepřerušovaný sluneční svit, oblačnost by měla být minimální. Letní dny jsou výhodnější než zimní z důvodu intenzivnějšího a delšího slunečního osvětlení. Inspekce by měly být prováděny alespoň 4 hodiny po východu slunce, z důvodu vytvoření dostatečného tepelného kontrastu. V takovém případě lze s velkou pravděpodobností odhalit delaminace i v hloubce okolo 5 cm.

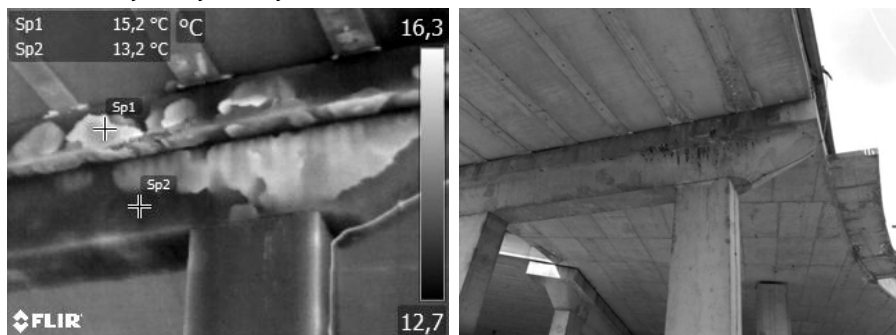


Obr. 7 Boční pohled na nosník typu I73 mostu; v bodě Sp1 je delaminovaná krycí vrstva, v bodě Sp2 již došlo k odtržení této vrstvy

Fig. 7 Side view of beam bridge type I73; at point Sp1 there is a delaminated cover layer, at point Sp2, this layer has been torn off

Měření lze provádět i na površích, které nejsou vystaveny slunečnímu záření. Doporučuje se provádět inspekce ve dnech, ve kterých se očekává změna okolní teploty vzduchu alespoň o 10°C. Tedy zpravidla ve dnech, kdy je dostatečný rozdíl mezi denní a noční teplotou. Obecně platí, že rychlejší nárůst okolní teploty má za následek výraznější teplotní kontrast. Ve chvíli, kdy se změní růst teploty na pokles, nastává také snižování tepelného kontrastu až do úplného vymizení. Geometrie mostu spolu s okolním terénem a vegetací mohou mít za následek, že se teplota vzduchu v blízkosti mostu bude měnit jen velmi pomalu, což znemožní vznik tepelného kontrastu na jeho povrchu, a tedy neumožní měření. Na obrázku 8 je podhled mostu mimoúrovňové křižovatky. Rozdíl mezi delaminací a neporušeným povrchem dosahuje v tomto případě

2°C. Obecně jsou hodnoty teplotních kontrastů na stíněných površích nižší než při měřeních objektů vystavených slunečnímu záření.



Obr. 8 Delaminovaný povrch příčle a úložného prahu

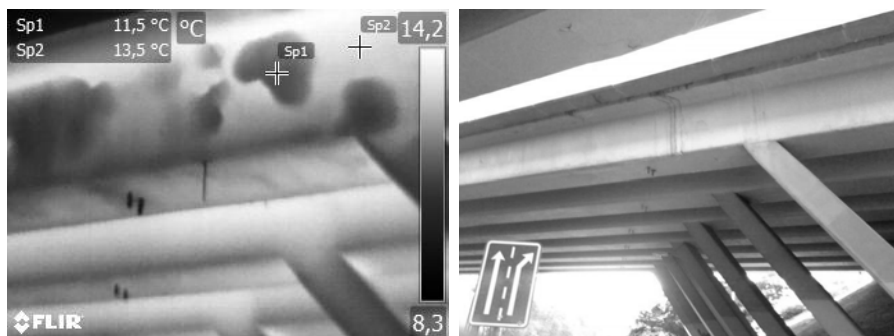
Fig. 8 Delaminated surface of the beam and storage threshold

Měření lze teoreticky provádět i v nočních hodinách, delaminaci však v tomto případě označuje negativní teplotní kontrast. S měřením je vhodné začít nejdříve jednu hodinu po západu slunce. Z hlediska provádění je ovšem praktičtější ranní měření. Pokud se teplota vzduchu uplynulou noc pohybovala alespoň o 10 stupňů níže než předchozí den, lze při dostatečném teplotním kontrastu provádět měření i v ranních hodinách. Toto měření je možno provádět do doby, než začne teplota vzduchu i konstrukce opět růst, tedy přibližně jednu hodinu po východu slunce. Klasickým příkladem je teplý den, po kterém následuje bezoblačná noc, kdy teploty většinou klesají na nižší teploty.

Při poklesu teploty platí, že se delaminované oblasti ochlazují rychleji, než neporušený povrch. Proto se budou tyto poruchy na termogramech jevit jako chladnější (obr. 9). Omezení týkající se geometrie mostu a jeho okolí jsou stejná jako při měření ve dne.

Nedoporučuje se provádět měření ve dnech, kdy se denní teploty příliš neliší od těch nočních a zároveň na zkoumaný povrch konstrukce nedopadá sluneční záření. Typickým příkladem je sychravé podzimní počasí. V těchto situacích téměř nevzniká teplotní kontrast a poruchy tedy nemusí být zjištělné.

Dále není vhodné provádět měření v době, kdy přechází pozitivní teplotní kontrast v negativní a naopak (viz kap. 3 a obr. 4). V těchto okamžicích se teplota povrchu nad poruchou rovná teplotě okolního neporušeného betonu a proto nelze závady pomocí termokamery odhalit. Tato situace nastává zpravidla v ranních a podvečerních hodinách.



Obr. 9 Měření v ranních hodinách; delaminovaný povrch trámy nosné konstrukce mostu je chladnější než zbytek konstrukce – bod Sp1

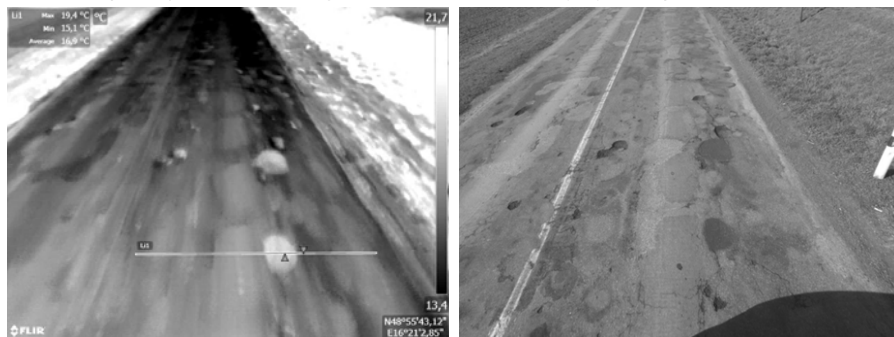
Fig. 9 Measurement in the morning; the delaminated surface of the bridge beam is cooler than the rest of the structure – point Sp1

6. Měření vozovek

Při diagnostice vozovek byla otestována termokamera umožňující natáčet tzv. termografické video. Měření bylo prováděno z jedoucího vozidla a termokamera byla upevněna na jeho střeše. Širokouhlý objektiv umožnil zachytit celý jízdní pruh.

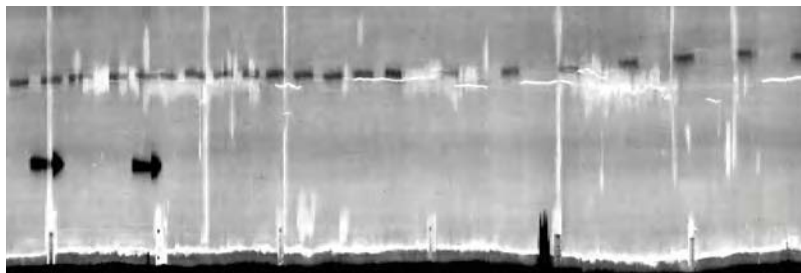
Měření je výhodné provádět za slunečného počasí, díky kterému lze na povrchu vozovky dosáhnout vyšších teplotních kontrastů. Naopak nevýhodou je rušení měření od stínů, které vrhá okolní zástavba nebo vegetace. Při měření a následné analýze lze mimo jiné lokalizovat výtluky, vysprávkky a trhliny.

Rovněž vysprávkky výtluků lze pomocí termokamery snadno lokalizovat. Vysprávkky bývají zpravidla z mírně odlišného materiálu a mají odlišný barevný odstín. Na obr. 10 jsou vysprávkky vyhotoveny z tmavšího materiálu, který se na slunci více zahřívá a proto je lze na termogramu dobře rozlišit díky vyšší teplotě.



Obr. 10 Lokalizace vysprávek pomocí termokamery

Fig. 10 Location of repairs using thermal camera



Obr. 11 Teplotní mapa měřené komunikace

Fig. 11 Thermal map of pavement

Jednotlivé snímky, ze kterých se skládá termografické video lze upravit a složit za sebe. Vznikne tím teplotní mapa měřené komunikace (obr. 11). Na termogramu je patrné vodorovné dopravní značení – černá barva nebo například asfaltová zálivka – nepravidelná bílá čára u středu vozovky.

Mimo měření na stávajících pozemních komunikacích lze využít termokameru i při výstavbě nových asfaltových vozovek. Jedním z rozhodujících faktorů ovlivňujících životnost asfaltobetonové vozovky je mezerovitost a objemová hmotnost asfaltové směsi. Teplotní segregace asfaltové směsi při pokládce vede k lokálním změnám mezerovitosti a tím i ke změnám objemové hmotnosti asfaltové směsi. Takto ovlivněná místa neumožňují dokonalé zhutnění asfaltové vrstvy a v průběhu provozu komunikace mohou být negativně ovlivněna dopravním zatížením a průsakem vody, který riziko budoucího poškození vozovky ještě zvyšuje.

Termokamera umožňuje sledování teploty nově pokládané asfaltové vrstvy během stavebních prací. Obsluha finišeru tak může v průběhu pokládky operativně přijmout nezbytné opatření pro zvýšení kvality budované vozovky. Na termosnímku (obr. 12) jsou za finišerem patrné oblasti s teplotou lišící se až o 30°C. Tyto rozdíly v teplotách vznikly v důsledku nerovnoměrného chladnutí asfaltové směsi na korbě nákladního vozidla. Pokud by došlo ještě k výraznějšímu vychladnutí směsi, může dojít ke zmíněným problémům se zpracováním a se zhutněním směsi.



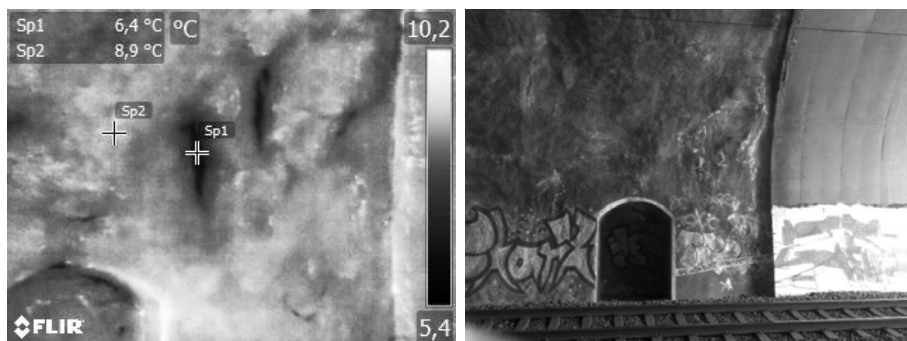
Obr. 12 Kontrola teplotní homogenity asfaltové směsi

Fig. 12 Checking the temperature homogeneity of the asphalt mixture

7. Měření v tunelech

Termokamera poskytuje slušné výsledky při měření na ostění tunelu ze stříkaného betonu. Nicméně, u nových tunelů se téměř žádné anomálie zaznamenatele pomocí termokamery nevyskytují. Jedním z důvodů může být fakt, že se tyto poruchy nenachází blízko povrchu a hlubší defekty nedokáže termokamera odhalit.

Princip zjišťování dutin je obdobný jako u mostů. Pro vytvoření teplotního kontrastu na povrchu ostění je nezbytný dostatečný rozdíl mezi noční a denní teplotou. Aby se tato změna venkovní teploty projevila i v tunelu, je potřeba dostatečného proudění vzduchu v něm. Naopak detekci průsaků vody a vlhkosti termokamerou lze provádět téměř bez omezení a nezávisle na okolní teplotě. Na obrázku 13 je díky tmavší, tedy chladnější barvě, patrný zátok v železničním tunelu.



Obr. 13 Termogram z měření v železničním tunelu

Fig. 13 Thermogram from measurements in the railway tunnel

Poděkování

Tento článek byl vytvořen za finanční podpory Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy v rámci programu Národní program udržitelnosti I, projektu Dopravní VaV centrum (LO1610) na výzkumné infrastruktuře pořízené z Operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace (CZ.1.05/2.1.00/03.0064).

Literatura

JANKŮ, Michal a Josef STRYK. *Metody termografického snímání objektů dopravní infrastruktury*. Brno: Centrum dopravního výzkumu, v.v.i., (ve schvalovacím procesu).

JANKŮ, Michal, Ilja BŘEZINA a Jiří GROŠEK. Use of Infrared Thermography to Detect Defects on Concrete Bridges. *Procedia Engineering*. 2017, (190), 62 - 69. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.308. ISSN 1877-7058.

CLARK, M. R, D. M MCCANN a M. C FORDE. *Application of infrared thermography to the non-destructive testing of concrete and masonry bridges*. DOI: 10.1016/S0963-8695(02)00060-9. ISSN 0963-8695

WASHER, Glenn, Richard FENWICK, Seth NELSON a Rilya RUMBAYAN. Guidelines for Thermographic Inspection of Concrete Bridge Components in Shaded Conditions. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2013, (2360), 13-20. DOI: 10.3141/2360-02. ISSN 0361-1981.