

DEFEKTOSKOPIE KOMPOZITNÍCH KONSTRUKCÍ DO- PRAVNÍCH PROSTŘEDKŮ

Alexander Čapka¹

Klíčová slova:

polymerní kompozitní materiál, nedestruktivní testování, aktivní infračervená termografie, vibrotermografie, teplotní vodivost

Key words:

polymer composite material, non-destructive testing, infra-red thermography, vibro-thermographie, thermal diffusivity

Abstrakt:

Polymerní kompozitní materiály (kompozity) jsou ve stavbě dopravních prostředků používány již víc jak 50 let. Kompozity mají výrazně odlišné vlastnosti od klasických konstrukčních materiálů - kovů. Kompozit se skládá ze dvou základních částí: matrice a výztuže. Kompozity se v dopravních prostředcích nejčastěji využívají ve dvou formách, jako laminát a sendvič. Materiály, polotovary a výrobky je nutno z mnoha důvodů zkoušet: zjišťování vlastností, vstupní, výstupní kontrola, poškození provozem, aj. Zkoušky mohou být destruktivní, kdy dojde ke zničení vzorku nebo výrobku a nedestruktivní, kdy pokud nebyla zjištěna vada, může být výrobek dále použit. Jedna z perspektivních metod zkoušení je metoda aktivní infračervené termografie a její varianta, kdy teplotní odezvy jsou vyvolány ultrazvukovou stimulací (vibrotermografie).

Abstract:

Polymer composite materials (composites) have been used in vehicle construction for over 50 years. Composites have markedly different properties from conventional structural materials - metals. The composite consists of two basic parts: matrix and reinforcement. Composites are most often used in vehicles in two forms, such as laminate and sandwich. Materials, semi-finished products and products have to be tested for many reasons: determination of properties, input, output inspection, operation damage, etc. The tests can be destructive, when the specimen or product is destroyed and nondestructive, if the defect is not found, the product can be used. The prospective method of testing is the active infrared thermography method and its variant, where the temperature responses are induced by ultrasound stimulation (vibrothermography).

ÚVOD

V současnosti jsou polymerní kompozitní materiály (PKM) využívány ve stavbě širokého spektra dopravních prostředků. Historicky nejstarší je využití PKM ve stavbě letadel. V současnosti jsou PKM součástí již všech druhů dopravních prostředků. Příkladem může být kompozitní sendvičová deska PUROXIT®, určená zjm. pro osobní železniční vozy (podlahy). V roce 1961 začal vývoj elegantních "Laminátek", dnes lokomotivy řady 230,

¹ Ing. Alexander Čapka, PhD. Vysoká škola logistiky v.o.s., Palackého 1381/25, 750 02 Přerov,
Tel: +420 581 259 173, e-mail: alexander.capka@vslg.cz

kteře mají kabinu stanoviště strojvedoucího vyrobenou z velkoplošných skelných laminátů metodou vstřikováním do formy, viz obr. 1.

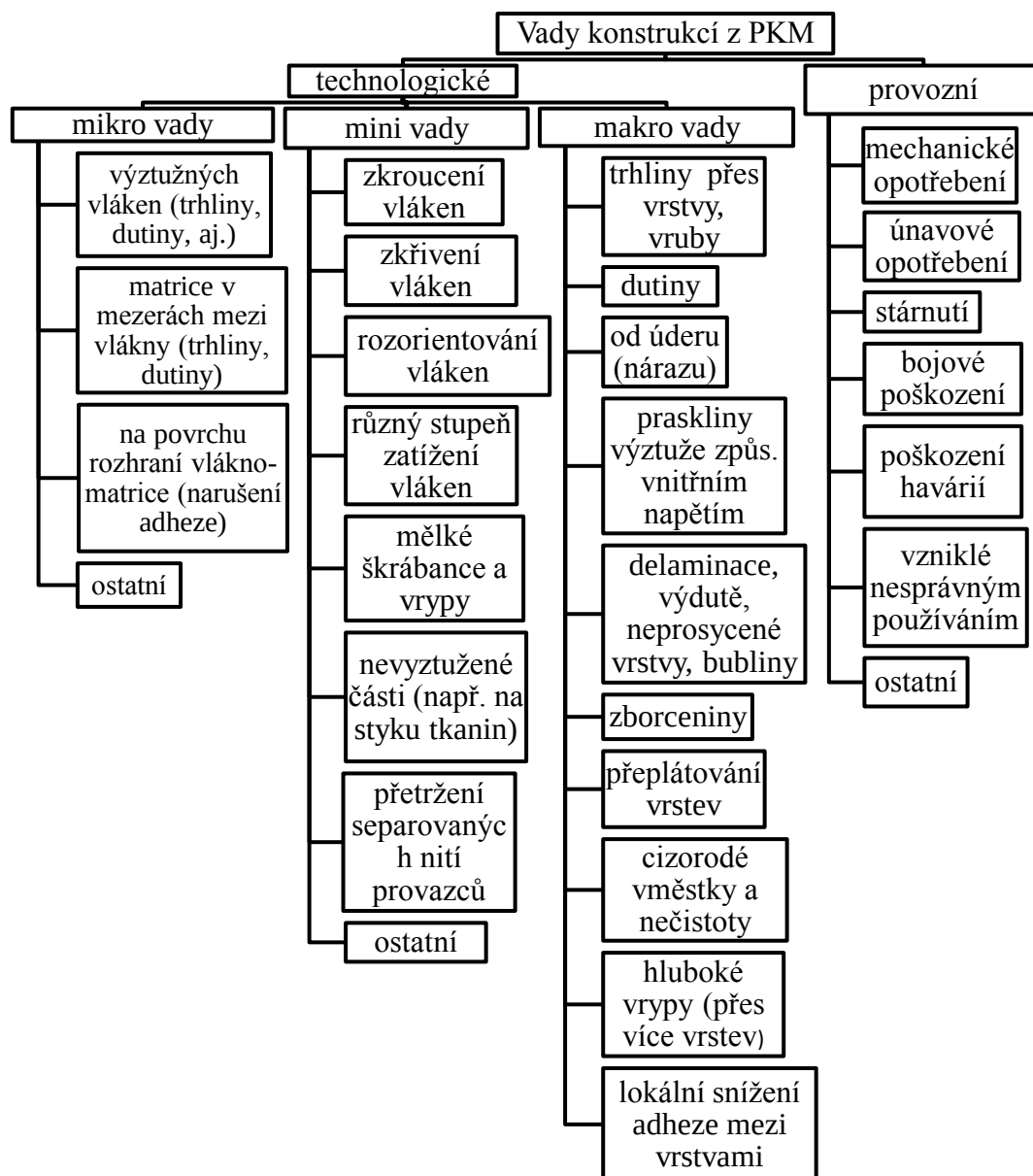


Obr. 1 Lokomotiva řady S 489.0 (230) "Laminátka"

Kompozitní materiál (KM, lze i používat kompozit) je konstrukční materiál složený ze dvou nebo více chemicky a fyzikálně odlišných složek (fází), které se vzájemně mezi sebou nerozpouštějí a mají mezi sebou vždy identifikovatelné fázové rozhraní; skládají se vždy z matrice a výztuže. Polymerní kompozitní materiál má matici (nebo i výztuž) z polymeru. Vláknový kompozit je konstrukční materiál s dlouhou výztuží, kdy délka výztuže mnohonásobně převyšuje její průměr; výztuž musí být pevnější než matrice a musí mít vyšší tuhost jak matrice. Laminát je kompozit vytvořený ze dvou nebo více vrstev (lamin) obsahující vyztužující vlákna orientované v jednom nebo ve více směrech; vzniká až při výrobě polotovaru nebo výrobku. Matrice je základní složka (fáze) kompozitu, která slouží k uložení výztuže, přenáší zatížení na výztuž a zajišťuje tvar výrobku, chrání výztuž před poškozením; obvykle má nižší pevnost než výztuž. Výztuž je zpevňující složkou kompozitu, která u vláknových kompozitů přenáší většinu zatížení a má větší pevnost než matrice a je sestavena z vláken.

Vady v PKM mohou vzniknout ve výrobě nebo v provozu. Výrobní vady zahrnují např. rozlepení nebo neslepené plochy, oblasti s velkým množstvím pryskyřice, vzduchové bubliny, tepelné poškození, impakty (pád), aj. Příčinou těchto vad bývá nesprávné vytvrzování, obrábění (broušení), nesprávná laminace, znečištění, aj. Vady v provozu mohou vzniknout z důvodu poškození nárazem, únavou materiálu, místním přetížením konstrukce, erozí, vlivem provozního okolí (vlhkost, teplota). Mezi nejčastější vady kompozitů patří delaminace a rozlepení konstrukce. Při delaminaci dojde k vzduchovému rozhraní mezi vrstvami v laminátu. Příčinou může být tvorba matricových trhlin vzniklých po nárazu. K rozlepení může dojít díky malé adhezi mezi dvěma prvky. Kritičnost vzniku delaminace nebo rozlepení závisí na rozměrech, druhu zatížení, přítomnosti koncentrátorů napětí, blízkosti okrajů součástí, tvaru součástí, atd.

Vady v kompozitních materiálech je možné rozdělit podle lokalizace na vady vnitřní a povrchové a podle doby, kdy vznikly na vady vzniklé při výrobě a vady z provozu výrobku. K vadám patří i konstrukční vady, jako např. špatně navržené detaily konstrukcí, které mohou mít vliv na vznik napěťových špiček. Na obr. 2 jsou uvedeny vybrané druhy vad PKM.



Obr. 2 Rozdělení vad v konstrukcích z PKM

Materiály, polotovary a výrobky je nutno z mnoha důvodů zkoušet: zjišťování vlastností, vstupní, výstupní kontrola, poškození provozem, aj. Zkoušky mohou být destruktivní, kdy dojde ke zničení vzorku nebo výrobku a nedestruktivní (defektoskopie), kdy pokud nebyla zjištěna vada materiálu, polotovaru nebo výrobku, může být tento dále použit. Provedení jakékoliv destruktivní zkoušky na výrobku (např. vozidle nebo letounu), resp. jeho části, která ještě nemá být dle opravárenské dokumentace vyměněna, není z ekonomického pohledu možné. Proto byla vyvinuta celá řada metod nedestruktivního testování (NDT).

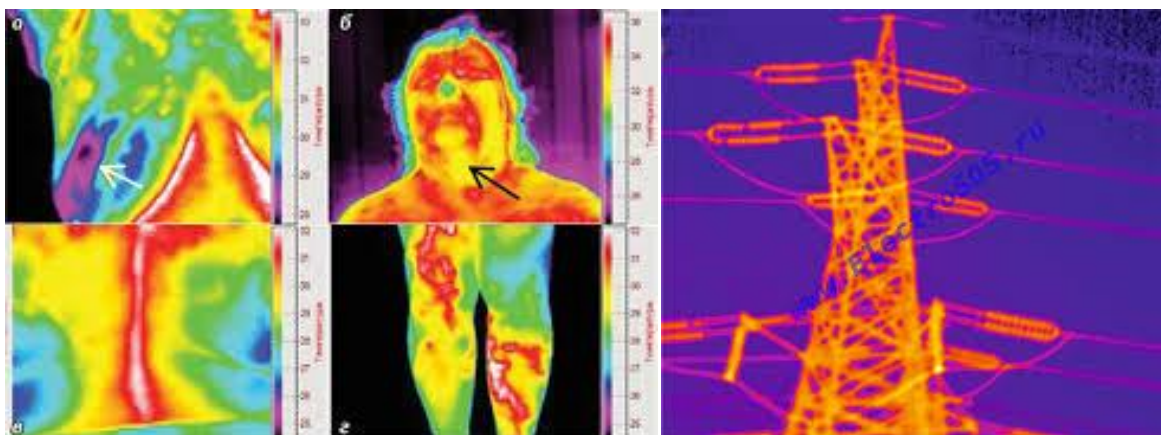
Metody destruktivního testování polymerních kompozitních materiálů jsou převážně standardizované. Některé NDT metody mají také svůj standard. Mnohé z těchto metod jsou známé z testování kovů. Některé tyto metody však neberou do úvahy to, že kovy jsou izotropní materiály a kompozity mají nehomogenní anizotropní struktury. Proto některé stávající metody NDT kompozitních materiálů mají řadu nedostatků, v důsledku čehož v

současné době probíhají studie v předních výzkumných centrech v oblasti NDT zaměřené na vývoj a zlepšování nejúčinnějších diagnostických metod pro testování PKM. Jedna z perspektivních metod je metoda aktivní infračervené termografie (IRNDT) a její varianta, kdy teplotní odezvy jsou vyvolány ultrazvukovou stimulací (vibrotermografie). Z velkého množství NDT metod pro zkoušení PKM lze uvést:

- vizuálně-optické metody,
- zvukové metody (např. Tap Test metoda (kladívko)),
- vířivé proudy,
- ultrazvuk (asi nejrozšířenější a nejznámější, např. ultrazvuková spektroskopie),
- elektromagnetické (mikro)vlny,
- počítačová rtg. tomografie (mimo pořadí),
- laser-ultrazvuková defektoskopie,
- laserová vibrometrie,
- laserová shearografie (1. místo, viz dále: hodnocení NDT metod),
- infračervená termografie (2. místo),
- ultrazvuková infračervená termografie (varianta infračervené termografie).

V [1] je provedena analýza vhodnosti uvedených NDT metod pro testování PKM. Nejlepších výsledků lze dosáhnout počítačovou tomografií. Jedná se však o velmi drahou metodu využitelnou zatím pouze v laboratorních podmínkách (proto mimo pořadí). První místo v hodnocení metod NDT zaujala laserová shearografie. Druhou nejvhodnější NDT metodou pro testování PKM je dle [1] aktivní infračervená termografie. Jedná se o metodu řádově levnější než je počítačová tomografie, využitelnou v provozních podmínkách dopravní techniky (i v leteckém provozu).

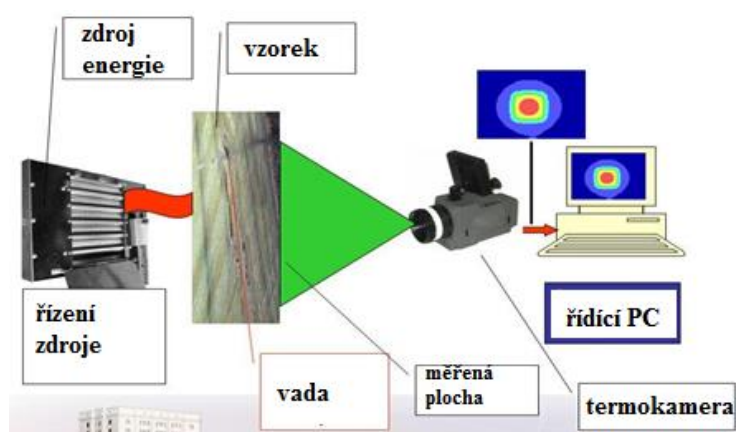
Infra-červená (IR - Infra Red) termografie je analytická technika založená na detekci záření objektů v IR spektru vlnových délek. Takto v souladu se zákonem vyzařování absolutně černého tělesa září všechna tělesa, jejichž teplota je vyšší než absolutní nula. Zařízení, které detekuje a skládá 2D obraz IR záření se obecně nazývá termografická kamera (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. Termogram je proto obrazem rozložení povrchové teploty tělesa a IR termografie se nejčastěji využívá k bezkontaktnímu měření prostorového a časového rozložení teplotních polí. Termografie je pasivní nebo aktivní. Pokud se při měření uměle neovlivňuje teplota součásti a měří se její přirozená teplota nebo přirozeně vzniklé teplotní kontrasty, jedná se o pasivní termografii, obr. 3. Při aktivní termografii se teplota součásti ovlivňuje vnějším zdrojem (bleskové světlo, zdroj teplého vzduchu, ultrazvuková stimulace).



Obr. 3 Příklady pasivní termografie

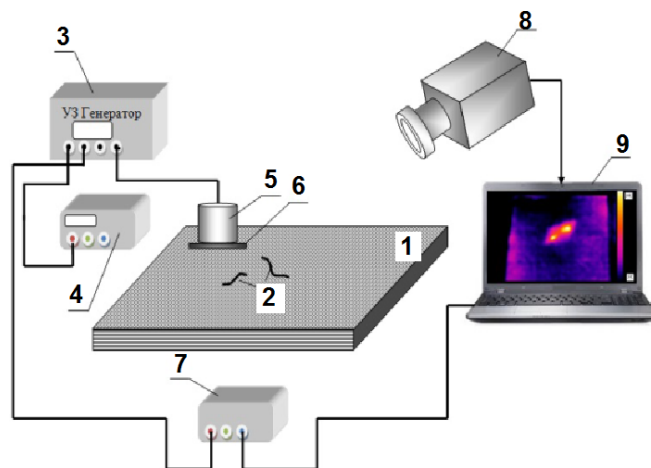
AKTIVNÍ INFRAČERVENÁ TERMOGRAFIE

Teplotní vodivosti materiálu je vlastnost charakterizující vedení tepla. Tato vlastnost popisuje, jak rychle materiál reaguje na změny teploty. Podle hodnoty součinitele teplotní vodivosti lze usuzovat na rychlost změny teploty v určitém místě materiálu v důsledku změny jeho povrchové teploty. Na měřeném objektu je uměle aplikováno vybuzení externím zdrojem (např. studiovým fotobleskem nebo ultrazvukem), který způsobí vznik teplotních kontrastů spojených s materiálovými nehomogenitami nebo výskytem vad v materiálu. Pracoviště pro aktivní infračervenou termografii se skládá z měřeného vzorku, zdroje světla se zdrojem energie s řídicí jednotkou a z termokamery. To vše řídí a vyhodnocuje počítač. Na obr. 4 je znázorněno pracoviště pro aktivní infračervenou termografii. Toto pracoviště se skládá z měřeného vzorku, zdroje světla (blesková halogenová nebo LED lampa) se zdrojem a řídicí jednotkou světla, termokamery a řídicího a vyhodnocovacího počítače.



Obr. 4 Pracoviště aktivní IRNDT

Ultrazvuková infračervená termografie je vhodným doplňkem aktivní IRNDT. Výsledky získané pomocí ultrazvukové a optické stimulace se navzájem doplňují a lze je použít pro syntézu dat. Současně je standardní IRNDT nejúčinnější pro detekci vad s vysokým tepelným odporem a ultrazvuková infračervená termografie je vhodnější pro detekci mikrotrhlin. Na obr. 5 je strukturální schéma experimentálního uspořádání pro ultrazvukovou IR termografii.



Obr. 5 Strukturální schéma experimentálního uspořádání pro ultrazvukovou IR termografii

(1 - vzorek, 2 - defekty, 3 - akustický oscilátor, 4 - ovladač oscilátoru, 5 - snímač, 6 - kontaktní vrstva, 7 - blok synchronizace, 8 - termokamera, 9 - osobní počítač, který zajišťuje sběr a zpracování digitálních dat, jakož i pro analýzu vad)

Fyzikálním základem termografie je Plankův zákon tepelného záření, který popisuje spektrální šíření energetické svítivosti tělesa ($r(\lambda, T)$). Termokamera snímá infračervené záření z povrchu snímaného vzorku a toto záření transformuje na viditelný obraz. Přenos tepla radiací se nachází v teoretickém rozsahu vlnových délek (0,75 – 1000) μm , v praxi (3 – 14) μm . Termokamera teplotu povrchu neměří, ale na základě intenzity infračerveného záření teplotu vypočítává. Snímky pořízené termokamerou lze dále zpracovat v různých programech (Matlab, ThermoFit Pro). Při ohřevu vzorku se využívá Diakovův impuls a Parkerovou metodou [2] se vyhodnocuje pořízený termogram. Parkerovou metodou se zjišťuje teplotní vodivost (thermal diffusivity) a dle rovnice:

$$a = \frac{\lambda}{C \cdot \rho}$$

kde: a je teplotní vodivost [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]
 λ – tepelná vodivost [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]
 C – tepelná kapacita [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]
 ρ – hustota [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

Ultrazvuková IR termografii je založena na vyhodnocení ekvivalentní tepelné energie generované vadami pod povrchem, které jsou ozářeny mechanickými vlnami v ultrazvukovém rozsahu. Poškození kompozitů je vhodné simulovat se sadou svazků různých tvarů a hloubek, které jsou zdroji tepla s výkonem až několika stovek miliwattů (při frekvenci ultrazvukových vibrací 22 kHz; při použití elektrického magnetostriktoru až několik kilowattů). V oblastech poškození se až 20% akustické energie přemění na tepelnou energii. Takový výkon je dostatečný pro generování teplotních signálů až do (4–12)° C. Zdrojem uvolňování tepla je vnitřní tření stěn defektů a díky zeslabení procesů tepelné difúze lze diagnostikovat defekty umístěné v hloubkách až 1,5 mm.

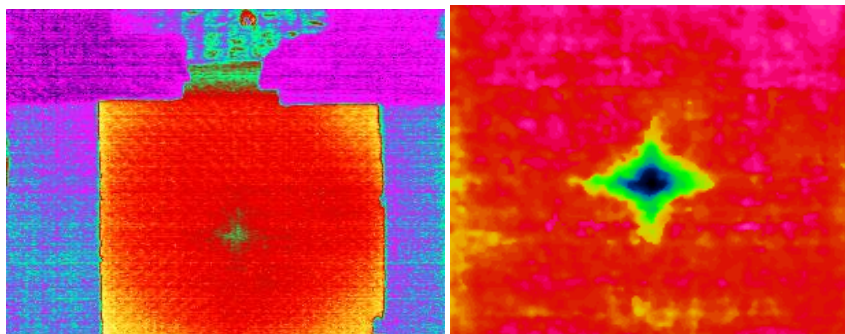
EXPERIMENTÁLNÍ VÝSLEDKY

V průběhu experimentů byly získány čtyři následující skupiny výsledků měření. První skupina experimentů se týkala aktivní IRNDT. Jako vzorky byly použity laminátové desky o rozměrech 100 x 100 mm vyrobené nejjednodušší výrobní technologií ručního laminování za mokra (HLU - Hand Lay-Up). Na matrici byla použita laminační pryskyřice a tvrdidlo EPIKORE Resin MGS LR285. Na výztuž uhlíková tkanina Kordcarbon CC160P1. Na obr. 6 je fotografie použitého vzorku. Následně byly vzorky poškozeny na zkušebním padostroji.



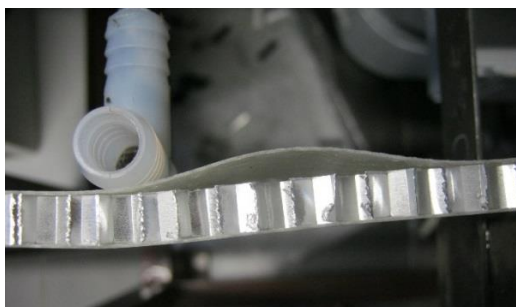
Obr. 6 Vzorek pro aktivní IRNDT

Termokamerou NEC 9100 byly pořízeny snímky (termogramy) poškozených vzorků. Následně byly termogramy zpracovány v programu ThermoFit Pro. Na obr. 7 vlevo je snímek z termokamery (termogram) a vpravo výsledné pole teplotní vodivosti, zpracované vyhodnocovacím počítačem s využitím Fourierovy transformace.

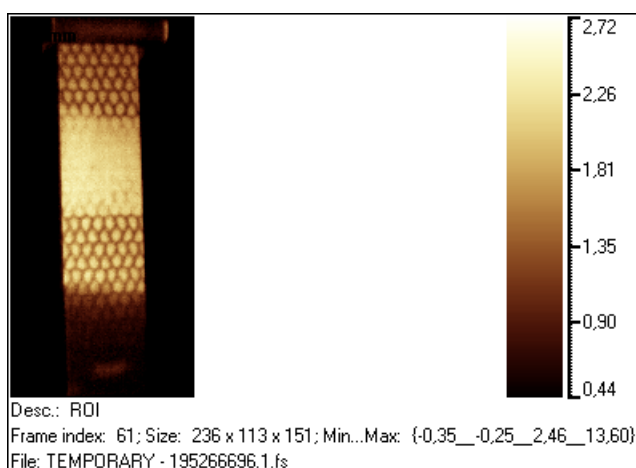


Obr. 7 Termogram (vlevo) a výsledné teplotní pole (vpravo)

Druhá skupina experimentů se opět týkala aktivní IRNDT. Úkolem bylo ověřit, zda lze pomocí IRNDT zjistit poškození sendvičového panelu. Byly vyrobeny vzorky sendvičových panelů s voštinovým jádrem z hliníkové slitiny a potahy (vnější krycí vrstvy) s PKM se skleněnou výztuží i s výztuží z uhlíkových vláken. Poté byly vzorky cyklicky zatěžovány až do odlepení jednoho potahu od jádra. Na obr. 8 je vzorek po ukončení cyklování s odlepeným potahem. Na obr. 9 je zcela jasně vidět hranice odlepení potahu od jádra. V ploše, kde jsou potahy přilepeny k voštinovému jádru je dobře viditelný tvar voštinových buněk. V místě, kde je potah odlepený, je tvar buněk vidět nezřetelně.



Obr. 8 Vzorek s odlepeným potahem



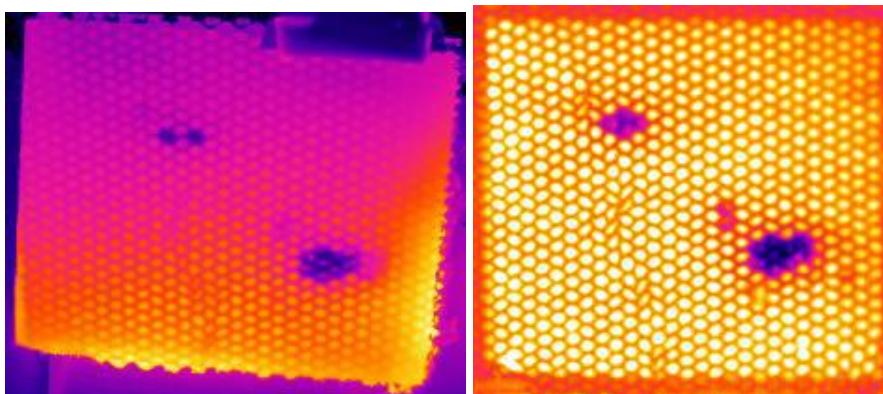
Obr. 9 Termogram poškozeného sendvičového panelu

Třetí skupina experimentů se týkala detekce vody (ledu) v sendvičových panelech leteckých konstrukcí, obr. 10. Při nesprávné technologii výroby a výrobních podmínkách nebo při provozu (např. kroupy), dochází ke vztlínání vody skrz defekty vzniklé při výrobě nebo provozu do jádra sendvičové konstrukce. K prolínání vody dochází i při běžném provozu letadla a to zejm. vlivem změny teploty při změnách výšky (13 km: až - 55°C, 0 km: až 55°C), kdy dochází ve výškách kolem 10 km k zamrznutí naakumulované vody a tím k roztahování jádra a následnému odlepování potahů (z PKM). Jedná se o cyklické namáhání leteckých konstrukcí, které nebylo až do roku 2000 známo!

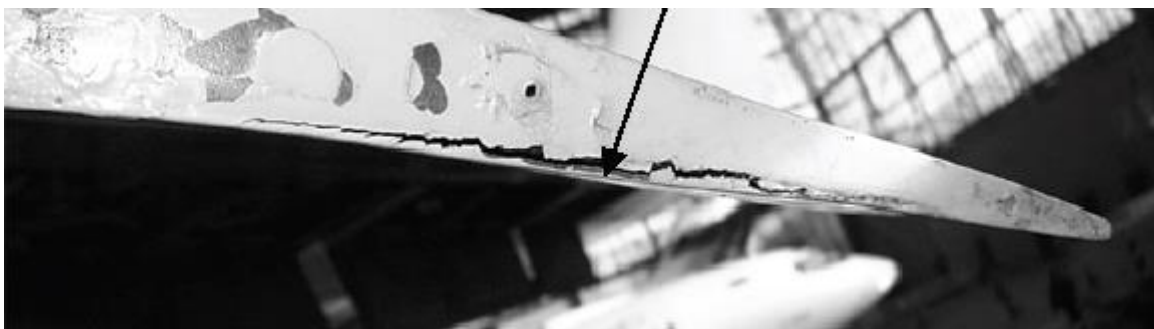


Obr. 10 "Mechanika" křídla civilního letadla ze sendvičových materiálů

Na obr. 11 vlevo je snímek z termokamery (aktivní IRNDT) a vpravo výsledné pole teplotní vodivosti, zpracované vyhodnocovacím počítačem. Na obr. 12 je skutečné poškození klapky osobního letadla. Metoda je podrobně popsána v [3].



Obr. 11 Termogram (vlevo) a výsledné teplotní pole (vpravo) s akumulovanou vodou v jádru sendvičového materiálu

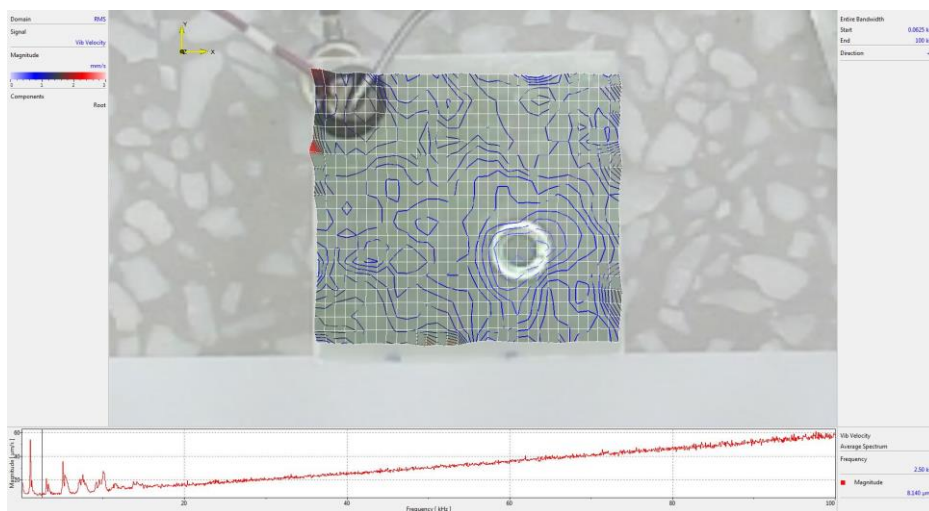


Obr. 12 Poškození klapky letounu - odlepený potah

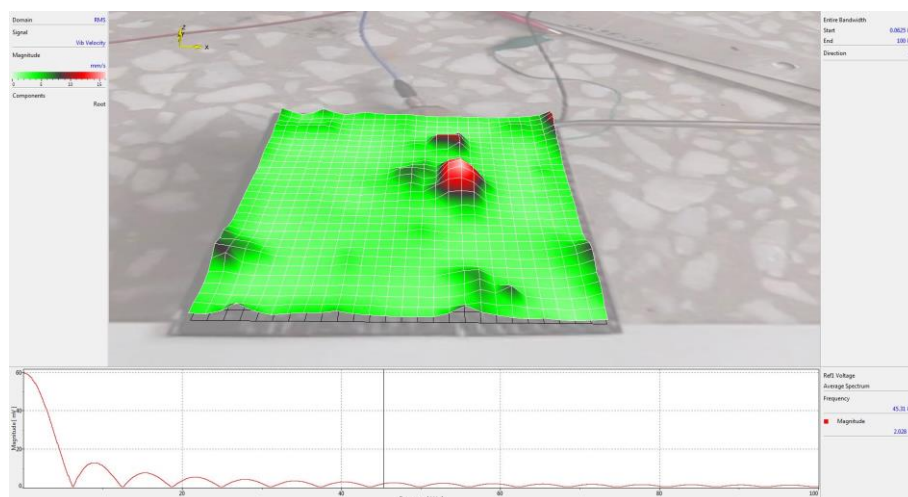
Čtvrtá skupina experimentů se týkala ultrazvukové IR termografie. Na obr. 13 je zalaminovaná kovová podložka v desce z PKM (matrice - pryskyřice, výztuž skelné vlákno). Na obr. 14 je dvourozměrné pole celkových vibračních obrazců v širokopásmovém skenovacím režimu ve frekvenčním rozsahu od 0 do 100 kHz a na obr. 15 toto pole zobrazeno ve 3D.



Obr. 13 Vzorek pro ultrazvukovou IR termografii



Obr. 14 Dvourozměrné pole celkových vibračních obrazců



Obr. 15 Trojrozměrné pole celkových vibračních obrazců (potočeno)

ZÁVĚR

Obr. 7, 9 11, 14 a 15 zcela jasně dokumentují, že metoda IRNDT je metodou, která je schopna odhalit vady v konstrukcích z PKM. Lze konstatovat, že IRNDT poskytuje grafické výstupy srozumitelnější (čitelnější), než např. klasické ultrazvukové defektoskopické metody.

Experimenty potvrdily, že metody IRNDT jsou optimální metody pro praktické využití v diagnostice kompozitních konstrukcí dopravních prostředků včetně letadel. Teprve metoda aktivní IRNDT přinesla po roce 2000 objev příčiny poškození sendvičových konstrukcí letadel vzniklých akumulací vody.

LITERATURA (REFERENCES)

- [1] VAVILOV, Vladimír. *Инфракрасная термография и тепловой контроль*. 1. Moskva: Spektr, 2009. ISBN 978-5-904270-05-6.
- [2] PARKER W.J. a R.J. JENKINS, et al., *A Flash Method of Determining Thermal Diffusivity, Heat Capacity, and Thermal Conductivity*. U.S. Navy Report USNRDL-TR-424, May 1960
- [3] VAVILOV, V. P., Y. PAN, A. I. MOSKOVCHENKO a A. ČAPKA. Modelling, detecting and evaluating water ingress in aviation honeycomb panels. *Quantitative InfraRed Thermography Journal*. 2017, 14(2), 206-217. DOI: 10.1080/17686733.2017.1317443. ISSN 1768-6733.

