

# ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní – Ústav přístrojové a řídicí techniky



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

## AKTIVNÍ TERMOGRAFIE PRO ODHAD ROZMĚROVÝCH DEFECTŮ

ACTIVE THERMOGRAPHY FOR ESTIMATION OF DIMENSIONAL DEFECTS

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Chernenko** Jméno: **Artem** Osobní číslo: **453226**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav přístrojové a řídicí techniky**  
Studijní program: **Strojírenství**  
Studijní obor: **Informační a automatizační technika**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Aktivní termografie pro odhad rozměrových defektů**

Název bakalářské práce anglicky:

**Active Thermography for Estimation of Dimensional Defects**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Nastudujte problematiku termografie, rovnice termografie, postupu při stanovování povrchové teploty pomocí termokamery, a problematiku šíření tepla (sálání, proudění, vyzařování).
- 2) Nastudujte problematiku aktivní termografie, především pak s ohledem na jednotlivé typy termografie a odlišnosti mezi nimi a to jak stran vstupního energetického buzení, tak stran zpracování naměřených dat.
- 3) Pro jednotlivé typy aktivní termografie diskutujte vhodné aplikační využití a vhodné specifické úlohy.
- 4) Sestavte vhodný fantom s defekty různých rozměrů (poloměr, hloubka, umístění) a s jeho pomocí otestujte vybranou z metod aktivní termografie. Diskutujte naměřené výsledky
- 5) Otestujte zvolenou metodu aktivní termografie na dvou různých materiálech a diskutujte naměřené hodnoty.

Seznam doporučené literatury:

- [1] V. Lysenko, Senzory neelektrických veličin 2. díl, Detektory pro bezdotykové měření teplot, BEN 2005 (NTK)
- [2] F. Helebrant, V. Moni, M. Hudecsek, P. Urban, Technická diagnostika a spolehlivost, V. Termografie, VŠB TU Ostrava 2008 (NTK)
- [3] M. Langenkamp, Lock-in Thermography: Basics and Use for Evaluating Electronic Devices and Materials, Springer, 2010 (Amazon)
- [4] W. Minkina, S. Dudzik, Infrared Thermography: Errors and Uncertainties, Wiley, 2009 (Amazon)

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:


**prof. Ing. Milan Hofreiter, CSc., U12110.3**


Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

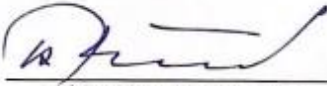
Datum zadání bakalářské práce: **29.10.2021**

Termín odevzdání bakalářské práce: **20.01.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: \_\_\_\_\_

  
prof. Ing. Milan Hofreiter, CSc.  
podpis vedoucí(ho) práce

  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


  
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

**09.11.2021**

Datum převzetí zadání

  
Podpis studenta

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně s použitím literárních pramenů a informací, které cituji a uvádím v seznamu použité literatury a zdrojů informací.

Datum: .....

.....

Podpis

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce se zabývá aplikací aktivní termografie pro odhad rozměrových defektů. Existuje rozdělení metod aktivní termografie na optickou, mechanickou a elektromagnetickou, které se zase dělí na lock – in a pulzní termografii. V praktické části probíhá ověření jedné z metod na připraveném zkušebním vzorku. Rovněž porovnáme jednu z metod na vzorcích vyrobených z různých materiálů.

## **Klíčová slova**

Infračervená termografie, aktivní termografie, rovnice termografie, pulzní termografie, lock – in termografie, techniky zpracování signálu

## **Abstract**

The scope of this thesis is to use active thermography for defect detection. There is a division of active thermography into optical, mechanical, and electromagnetic, which in turn are divided into pulse and lock – in. In the practical part, one of the methods is tested on a prepared sample. We also compare one of the methods on samples made from different materials.

## **Keywords**

Infrared thermography, active thepmography, thermography equations, pulse thermography, lock – in thermography, signal processing techniques

## Obsah

1. ÚVOD.....	8
2. Základy teorie termografie .....	9
2.1 Absolutně černé těleso .....	9
2.1.1 Zákony tepelného vyzařování .....	10
2.2 Emisivita, odrazivost, propustnost.....	11
3. Rovnice termografie.....	13
4. Postup měření povrchové teploty pomocí termokamery.....	14
4.1 Vliv emisivity a její určení.....	14
4.1.1 Metoda stanovení emisivity.....	15
4.2 Odrážená zdánlivá teplota .....	15
4.2.1 Princip stanovení odražené zdánlivé teploty .....	16
4.3 Vliv atmosféry .....	16
4.4 Parametry termokamery.....	17
5. Aktivní termografie .....	19
5.1 Úvod .....	19
5.2 Princip metody aktivní termografie .....	20
5.3 Metody excitace aktivní termografie .....	21
5.3.1 Optická excitace .....	21
5.3.2 Elektromagnetická excitace .....	23
5.3.3 Mechanická excitace.....	25
5.4 Techniky zpracování 2 D signálu .....	26
5.5 Aplikační využití.....	28
6. Praktická část .....	29
6.1 Přehled použitého pracoviště .....	29
6.1.1 Návrh pracoviště .....	29
6.1.2 Termokamera.....	30
6.1.3 Zkušební vzorky.....	31
6.1.4 Výpočetní technika a software.....	33
6.1.5 Excitační zdroj .....	35
6.2 Testování metody.....	36
6.2.1 Postup měření.....	36
6.2.2 Zpracování naměřených dat .....	37

6.3 Testování metody aktivní termografie na dvou různých materiálech .....	43
7. ZÁVĚR .....	48

## Seznam symbolů a zkratek

$C^{\circ}$	stupeň Celsia	$\delta$	hloubka kůže
K	Kelvin	$f$	frekvence
nm	nanometr	$\mu_0$	permeabilita vakua
mm	milimetr	$\mu_r$	relativní magnetická permeabilita
$H, H_0$	intenzita vyzařování	$\rho$	elektrický odpor
$\alpha$	pohltivost	VT	vibrotermografie
$T$	teplota	$\Delta T$	absolutní tepelný kontrast
$\lambda$	vlnová délka	$t$	čas
$\sigma$	Stefan-Boltzmanova konstanta	$S_a$	nepoškozená oblast
$W$	watt	DAC	diferenciální absolutní kontrast
$kg$	kilogram	$\Delta T_{DAC}$	diferenciální absolutní kontrast
$s$	sekunda	TSR	rekonstrukce termografického signálu
$m$	metr	PPT	pulzně-fázová termografie
$b$	konstanta Wienova zákona	DFT	diskrétní Fourierova transformace
$c_1$	první vyzařovací konstanta	$Re$	reálná složka transformace
$c_2$	druhá vyzařovací konstanta	$Im$	imaginární složka transformace
$\varepsilon$	emisivita	$A$	amplituda
$\rho$	odrazivost	$\varphi$	fáze
$\tau$	propustnost	Hz	hertz
$\Phi$	tok tepelného vyzařování	$\mu m$	milimetr
$\beta$	úhel dopadu	tzv.	takzvaný
$\alpha$	úhel odrazu		Termokamery s rozsahem:
FOV	zorné pole		(SWIR) krátkých vlnových délek
X, Y, Z	souřadnice		(MWIR) středních vlnových délek
PT	pulsní termografie		(LWIR) dlouhých vlnových délek
LT	lock-in termografie		(NUC) korekce nerovnoměrnosti (kalibrace)

# 1.ÚVOD

Hlavním cílem této práce je podrobně se seznámit s pojmem infračervená termografie a aktivní termografie. Poté na základě prostudované teorie provést praktickou práci na použití a ověření aktivní termografie v praxi.

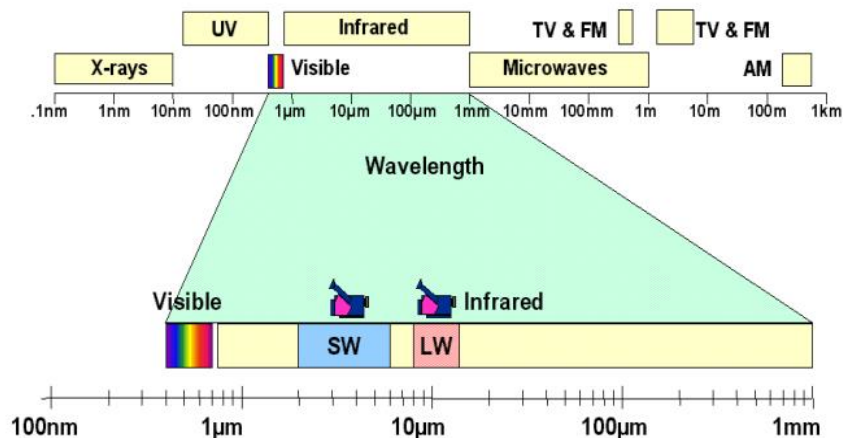
Ve druhé, třetí a čtvrté kapitole si podrobně projdeme základy teorie termografie, co to je termografická rovnice a z jakých složek se skládá princip termografického měření povrchové teploty. Pátá kapitola je věnovaná naučení základních nezbytných znalostí týkajících se aktivní termografie. Na konci této práce se pokusíme aplikovat získané znalosti k provedení experimentu s cílem vyzkoušet jednu z technik aktivní termografie a také porovnat určitou techniku na dvou vzorcích vyrobených z různých materiálů.



## 2. Základy teorie termografie

Infračervená termografie je věda založená na využití elektrooptických zařízení, pomocí kterých probíhá detekce a měření toku záření, a na základě těchto údajů se vypočítá teplota povrchů měřených objektů. Záření považujeme jako přenos tepla ve formě elektromagnetických vln bez použití žádného přechodného média pro jejich přenos. Hlavním zařízením používaným v termografii je termokamera, která opticky detekuje infračervené záření a poté jej převádí na obraz (termogram). Termogram je obraz objektu zpracovaný elektronikou pro zobrazení na displeji takovým způsobem, že různé barevné gradace odpovídají intenzitě infračerveného záření povrchem zkoumaného objektu [1].

Na obrázku 1 je znázorněno elektromagnetické spektrum, ze kterého je vidět, že infračervené záření s vlnovou délkou od 780 nm do 1 mm se nachází v neviditelné pro lidské oko části, mezi viditelným zářením a mikrovlnami. Každé těleso, které má teplotu vyšší, než je absolutní nula (0 K, -273,15 C°), vyzařuje záření v infračervené části elektromagnetického spektra. Tudíž pomocí termografie dokážeme změřit teplotu jakéhokoli objektu kolem nás. Intenzita toku infračerveného záření je přímo úměrná teplotě objektu, totiž teplejší objekt vyzařuje více infračerveného záření [3].



Obrázek 1. Elektromagnetické spektrum [2]

### 2.1 Absolutně černé těleso

Absolutně černé těleso je definováno jako teoretický model tělesa, jehož povrch ideálně pohlcuje totálně veškeré záření všech vlnových délek na něj dopadající. Říká se tomu “teoretický model”, protože ve skutečné přírodě neexistuje ani jeden materiál, který by měl takové fyzikální vlastnosti [4].

“V rovnovážném stavu tělesa je (Podle Kirchhoffova zákona) množství emitované energie z objektu stejné s množstvím absorbované energie”. Tudíž u absolutně černého tělesa platí, že jelikož těleso má vlastnost dokonale pohlcovat veškeré záření, stejně má vlastnost ideálně vyzařovat maximální možné množství tepla při určité teplotě a vlnové délce [2].

## 2.1.1 Zákony tepelného vyzařování

- Kirchhoffův zákon

Pojem absolutně černého tělesa zavedl německý fyzik Gustav Robert Kirchhoff. Kirchhoffův vyzařovací zákon popisuje, že poměr intenzity vyzařování  $H(T, \lambda)$  jakéhokoli tělesa k jeho absorpční schopnosti  $\alpha(T, \lambda)$  je stejný pro všechna tělesa při dané teplotě  $T$  pro danou vlnovou délku  $\lambda$  a nezávisí na jejich tvaru, chemickém složení, skupenství a povrchových vlastnostech. Z čeho je zřejmé, že hodnota absorpce tělesa je přímo úměrná jeho intenzitě vyzařování. A to znamená, že čím více těleso absorbuje energii, tím více ji vyzařuje. Kirchhoffův zákon také říká, že každá látka nejsilněji pohlcuje záření těch vlnových délek, které nejsilněji vyzařuje [2].

$$f(T, \lambda) = \frac{H(T, \lambda)}{\alpha(T, \lambda)}; [-] \quad (1)$$

- Stefan-Boltzmannův zákon

Tento zákon nám říká, že intenzita vyzařování  $H_o(T)$  absolutně černého tělesa závisí pouze na jeho teplotě a je přímo úměrná čtvrté mocnině jeho termodynamické teploty [2].

$$H_o(T) = \sigma \cdot T^4; [W] [kg \cdot m^2 \cdot s^{-3}] \quad (2)$$

Kde  $\sigma$  je Stefan-Boltzmannova konstanta s hodnotou

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} (W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4})$$

- Wienův zákon

Wienův posouvací zákon popisuje závislost vlnové délky  $\lambda_{max}$ , při které hodnota vyzařování černého tělesa dosáhne svého maxima, na teplotě černého tělesa  $T$ . To znamená, že čím větší teplotu má těleso, tím více energie vyzařuje na kratších vlnových délkách [2].

$$T \cdot \lambda_{max} = b; [-] [m \cdot K] \quad (3)$$

Kde  $b$  je konstanta Wienova zákona s hodnotou

$$b = 2,897 \cdot 10^{-3} (m \cdot K)$$

- *Planckův zákon*

Planckův zákon popisuje spektrální hustotu intenzity vyzařování  $H_o(T, \lambda)$  absolutně černého tělesa určité teploty [2].

$$H_o(T, \lambda) = \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{(e^{\frac{c_2}{T \cdot \lambda}} - 1)} ; \quad [W \cdot m^{-3}] \quad [kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-3}] \quad (4)$$

Kde  $c_1$  a  $c_2$  jsou první a druhá vyzařovací konstanta

$$c_1 = (3,741\ 832 \pm 0,00\ 020) \cdot 10^{-16} \quad [W \cdot m^2]$$

$$c_2 = (1,438\ 786 \pm 0,000\ 045) \cdot 10^{-2} \quad [m \cdot K]$$

## 2.2 Emisivita, odrazivost, propustnost

- *Emisivita  $\varepsilon$*

Na základě znalostí získaných z Kirchhoffova zákona byl zaveden takový pojem jako emisivita  $\varepsilon$ . Emisivita je bezrozměrná veličina charakterizující poměr množství tepelného záření objektu  $H(T)$  při dané teplotě  $T$  k množství záření absolutně černého tělesa  $H_o(T)$ . Jinými slovy, udává účinnost záření daného tělesa. Jak již bylo zmíněno, pokud je objekt ve stavu tepelné rovnováhy, pak energie vyzařovaná musí být rovna energii pohlcované, tudíž emisivita  $\varepsilon$  se rovná pohltivosti  $\alpha$  [2].

$$\varepsilon(T) = \frac{H(T)}{H_o(T)} ; \quad [-] \quad (5)$$

Povrch absolutně černého tělesa bude při stejné teplotě vyzařovat maximální množství tepla než jakékoli jiného tělesa. Maximální hodnota emisivity se rovná 1, kterou má jenom absolutně černé těleso, což ve skutečnosti neexistuje. Emisivitu hodně blízko k 1 mají takzvaná černá tělesa, ale většina reálných těles kolem nás, tzv. šedých, mají emisivitu v rozmezí od 0,1 do 0,95 [6].

Emisivita předmětu je dána vlastnostmi materiálu a čistotou povrchové úpravy objektu. Ale zároveň je funkcí vlnové délky a teploty, totiž v tabulkách emisivit běžných materiálů jsou hodnoty uvedeny buď pro určitý rozsah teplot a vlnových délek nebo je dan plný rozsah hodnot emisivit pro konkrétní materiál v závislosti na teplotě a vlnové délce. To znamená, že pro přesné měření je zapotřebí si pamatovat a vzít v úvahu tyto důležité faktory. Například běžný stavební materiál, jako je cihla červená hrubá, má emisivitu kolem 0,93, zatímco nějaký bronz leštěný (při teplotě kolem 50 °C) jenom 0,1. Velice malou hodnotu emisivity mají lesklé vyleštěné kovy, naopak oxidované kovy mají poměrně vysokou emisivitu jako u nekovových materiálů. Je zřejmé, že pro náš směr jsou materiály s vyšší hodnotou emisivity výhodnější, protože je celkem snadné měřit jejich teplotu, jinak je potřeba provést další úpravu povrchu měřeného objektu [7].

## ●Odrazivost $\rho$

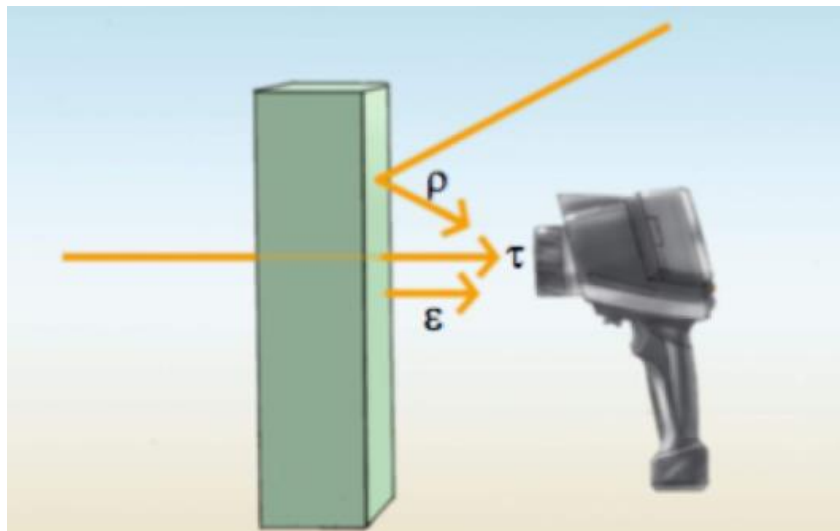
Odrazivost je bezrozměrná veličina charakterizující poměr množství tepelného záření, které se odráží z objektu k množství záření na něj dopadajícího. Stejně jako emisivita, hodnota odrazivosti závisí na vlastnostech materiálu a kvalitě jeho povrchu. Obvykle vysokou hodnotu odrazivosti mají lesklé, hladké povrchy. Matný a drsný povrch naopak má nízkou odrazivost. Jak víme z optiky úhel dopadu se rovná úhlu odrazu, to samé platí i u dopadajícího a odraženého záření [5].

## ● Propustnost $\tau$

Propustnost je bezrozměrná veličina charakterizující schopnost materiálu přenášet infračervené záření skrz sebe. Většina materiálu je odolná vůči dlouhovlnnému infračervenému záření, takže žádné záření skrz sebe nepropouští [5].

Pro názornější pochopení se podívejme na obrázek 2, na kterém jsou schematicky znázorněné složky záření vstupující do termokamery. Záření vyzářené přímo měřeným objektem je dáno jeho emisivitou  $\epsilon$ . Dále na obrázku vidíme složku záření  $\rho$ , které přichází z okolí a dopadá na povrch měřeného objektu, kde následně se odráží a vstupuje do objektivu termokamery. To znamená, že čím nižší je hodnota odrazivosti materiálu, tím méně odraženého záření vstoupí do termokamery. Poslední složkou je přenesené záření, které je dáno hodnotou propustnosti  $\tau$  materiálu, tj. čím menší je hodnota propustnosti, tím méně infračerveného záření daný materiál propouští skrz sebe. Součet těchto složek je vždy roven 1 ( $\cong 100\%$ ). Pro termografii to znamená, že čím nižší je emisivita, tím vyšší je podíl odraženého záření, tím obtížnější je přesné měření teploty.

$$\epsilon + \rho + \tau = 1$$



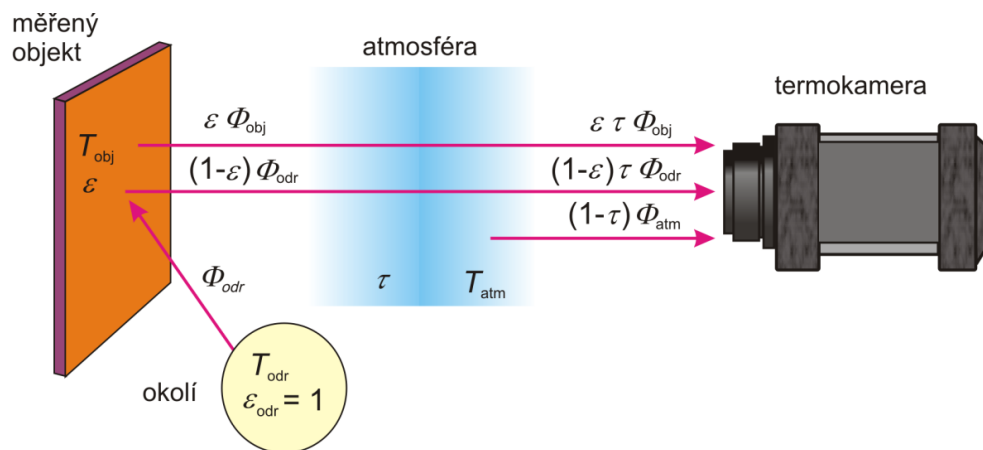
Obrázek 2. Složky záření vstupující do termokamery.  $\epsilon$ -vyzářené,  $\rho$ -odražené,  $\tau$ -přenesené [5]

### 3. Rovnice termografie

Rovnice termografie popisuje základní princip měření povrchové teploty objektu termokamerou. Termokamera neměří teplotu objektu přímo, ale detekuje jednotlivé složky záření. A proto se pro přesné měření povrchové teploty používá rovnice termografie, která zahrnuje mnoho ovlivňujících faktorů. Na obrázku 3 je znázorněn vlastně klasický model termografického měření povrchové teploty objektu. Hlavními složkami této soustavy jsou měřený objekt, atmosféra, termokamera a okolí [6].

- Rovnice termografie má následující tvar:

$$\Phi_{celk} = \varepsilon \cdot \tau \cdot \Phi_{obj} + (1 - \varepsilon) \cdot \tau \cdot \Phi_{odr} + (1 - \tau) \cdot \Phi_{atm} \quad (6)$$



Obrázek 3. Model termografického měření povrchové teploty [8]

Jak je vidět z obrázku a rovnice, celkové záření zaznamenané detektorem se skládá ze tří hlavních složek: přímo záření měřeného objektu, záření okolních předmětů odražené od povrchu měřeného objektu a záření vycházející z atmosféry [6].

- Podrobný popis všech proměnných rovnic:

$\Phi_{obj}$  je tok tepelného vyzařování z měřeného objektu, který je dán jeho emisivitou  $\varepsilon$ . Jelikož toto záření na své cestě prochází i atmosférou, je potřeba ho vynásobit koeficientem průchodu atmosférou  $\tau$ .

$\Phi_{odr}$  je odražený tok tepelného vyzařování okolí od měřeného objektu. V tomto případě není dán emisivitou měřeného objektu, ale jeho odrazivostí  $\rho$ , kde  $\rho = (1 - \varepsilon)$ . A stejně to vynásobíme koeficientem průchodu atmosférou  $\tau$ .

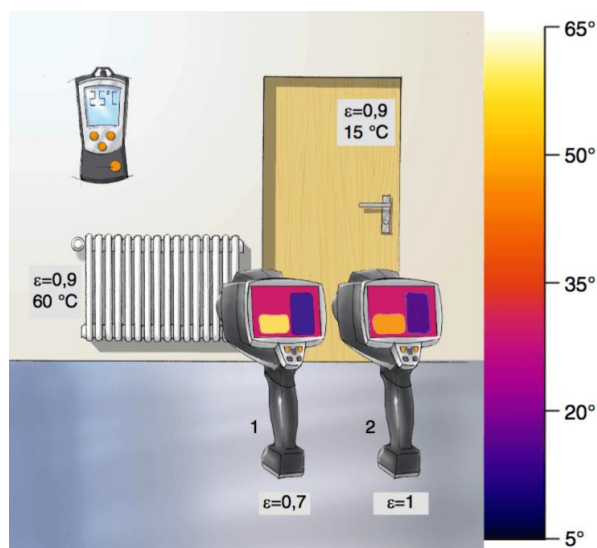
$\Phi_{atm}$  je tok tepelného vyzařování generovaný atmosférou, který je dán její emisivitou  $(1 - \tau)$  [6].

## 4. Postup měření povrchové teploty pomocí termokamery

Tato kapitola se zabývá podrobným popisem postupu měření povrchové teploty termokamerou. Jak jsme již zjistili z termografické rovnice, konečný výsledek měření je ovlivněn emisivitou samotného objektu, atmosférou, ve které se měří a okolím. Dále probereme více do hloubky každý z těchto faktorů. Zjistíme vliv a princip stanovení emisivity a odražené zdánlivé teploty, vliv atmosféry a základní parametry termokamery. Jelikož každá z těchto složek ovlivňuje přesnost měření, pro co nejlepší výsledky je nutné dodržovat všechna níže popsána pravidla a postupy.

### 4.1 Vliv emisivity a její určení

Správně a přesně určená emisivita objektu je klíčovým faktorem pro přesné měření povrchové teploty termokamerou. Pro lepší pochopení důležitosti emisivity se podíváme na obrázek 4, na kterém jsou dva měřené objekty, radiátor, jehož teplota je mnohem vyšší než teplota prostředí a dveře, jejichž teplota je nižší než teplota prostředí. K měření teploty se používají dvě stejné termokamery s vyšší a nižší nastavenou emisivitou, než ve skutečnosti mají objekty [5].



Obrázek 4. Vliv emisivity na výsledek měření [5]

Jak vidíme z obrázku:

-objekt (radiátor) teplejší, než je teplota okolí, je změřen termokamerou s nižší hodnotou emisivity jako teplejší, než ve skutečnosti je. A naopak termokamerou s vyšší hodnotou emisivity je změřen jako chladnější.

-objekt (dveře) chladnější, než je teplota okolí, je změřen termokamerou s nižší hodnotou emisivity jako chladnější, než ve skutečnosti je. A naopak termokamerou s vyšší hodnotou emisivity je změřen jako teplejší [5].

### 4.1.1 Metoda stanovení emisivity

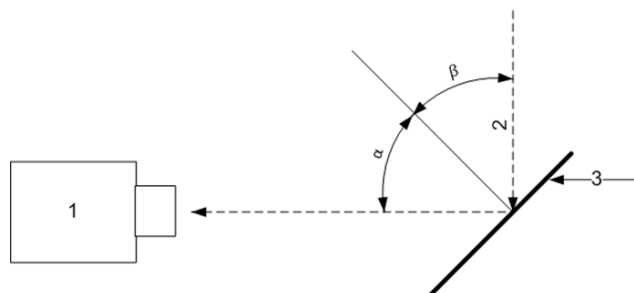
Existuje několik různých metod pro přesné stanovení emisivity povrchu objektu. Jako příklad uvedeme poměrně jednoduchou metodu, která s minimálním rozdílem může být použita jako kontaktní nebo bezkontaktní.

Nejprve potřebujeme stanovit hodnotu zdánlivě se odrážející teploty a zadat jí do parametrů nastavení termokamery. Při měření je doporučeno mít alespoň dvacetistupňový rozdíl teplot měřeného objektu a okolního prostředí. Pak nastavíme kameru na konkrétní místo povrchu, jehož teplotu budeme měřit. Následně pomocí kontaktního teploměru změříme aktuální teplotu povrchu objektu. Na konci zbývá pouze vybrat vhodnou hodnotu emisivity tak, aby při této hodnotě teplota změřená termokamerou odpovídala teplotě změřené kontaktním teploměrem. Ve výsledku máme správně stanovenou emisivitu povrchu, která platí pouze pro určitě umístěnou termokameru (vzdálenost, uhel), teplotu okolí, vlnovou délku apod. Jediný rozdíl mezi bezkontaktní a kontaktní metodou je ten, že u bezkontaktní metody na povrch měřeného objektu nanese speciální hmotu známé emisivity a teplotu povrchu změříme pomocí termokamery (za předpokladu stejné teploty v místě měřeného povrchu a v místě nanesené hmoty) [9].

## 4.2 Odrážená zdánlivá teplota

Jak již víme z rovnice termografie, velký vliv na přesnost měření má okolí měřeného objektu. Dalším důležitým parametrem, který se používá v procesu měření, je odrážená zdánlivá teplota. V úvodu do teorie termografie jsme probírali takový pojem jako odrazivost. Odrážená zdánlivá teplota v podstatě je veškeré tepelné záření vyzařované všemi tělesy v okolí měření, které se odráží od povrchu měřeného objektu a dopadá do objektivu termokamery. Tento parametr, stejně jako emisivita, je velmi důležitý pro přesné měření. Ale největší významnost má u měření povrchu s nízkou emisivitou. Jak již bylo zmíněno dříve, čím menší je emisivita, tím objekt má větší odrazivost. A to vede k tomu, že taková tělesa budou odrážet velké množství okolního záření, které se dostane do objektivu termokamery. Vzhledem k tomu, že termokamera není schopná rozlišit skutečné záření z objektu a odrážené, je potřeba pro přesnost výsledku stanovit hodnotu parametru odrážené zdánlivé teploty a zadat jí do nastavení termokamery [8].

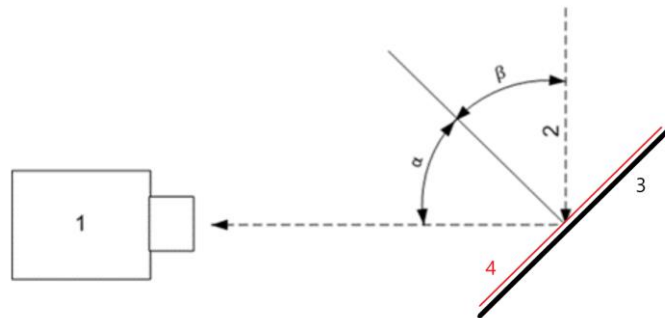
Na obrázku 5 je schematicky znázorněn princip ovlivnění měření odráženým zářením. Okolní záření 2 dopadá na povrch měřeného objektu 3 kde následně se odrazí a vstoupí do objektivu termokamery 1. Tady stejně jako v klasické optice platí, že úhel dopadu  $\beta$  se rovná úhlu odrazu  $\alpha$  [10].



Obrázek 5. Ovlivnění měření odráženým zářením [10]

### 4.2.1 Princip stanovení odražené zdánlivé teploty

Pro stanovení odražené zdánlivé teploty potřebujeme pouze termokameru a infračervený odražeč. Je to takové těleso, které má vlastnost ideálně odrážet veškeré na něj dopadající záření ve všech směrech. Jednou z nejjednodušších možností je použití lesklé hliníkové folie. Pro názornost principu stanovení odražené zdánlivé teploty se podívejme na obrázek 6, který byl upraven na základě obrázku 5. Začneme tím, že nastavíme v termokameře hodnotu emisivity na 1 a vzdálenost na 0. Během stanovení odražené zdánlivé teploty je potřeba umístit termokameru stejným způsobem, jakým bude následně měřena povrchová teplota daného objektu. Poté náš infračervený odražeč 4 (viz obrázek 6) umístíme před měřený povrch 3 tak, aby jeho plocha byla rovnoběžně s plochou měřeného objektu. V důsledku čehož veškeré záření 2 z okolí dopadající na infračervený odražeč se odrazí a vstoupí do objektivu termokamery 1. Tato změřená teplota je onou hledanou odraženou zdánlivou teplotou. Pokud měření probíhá třeba v laboratoři za skoro ideálních podmínek, tj. vysoká emisivita měřeného objektu, nepřítomnost výrazných okolních zdrojů tepelného záření a dalších ovlivňujících faktorů, lze jako odraženou zdánlivou teplotu použít hodnotu atmosférické teploty okolí [10].



Obrázek 6. Měření odražené zdánlivé teploty

### 4.3 Vliv atmosféry

Vliv atmosféry na přesnost měření není tak významný a problematický jako vliv emisivity a odražené zdánlivé teploty, ale i přes to je to důležitý faktor, který je třeba vzít v úvahu. V našem případě atmosférou rozumíme souhrn parametrů, z nichž nejvýznamnější jsou relativní vlhkost, teplota atmosféry a vzdálenost mezi termokamerou a měřeným objektem. Pro kompenzaci jejich vlivu, stejně jako emisivitu a odraženou zdánlivou teplotu, zadáme tyto hodnoty do nastavení termokamery. Je žádoucí, aby hodnota relativní vlhkosti byla co nejnižší, jelikož infračervené záření se pohlcuje molekulami vody. Samotná atmosféra také vyzařuje tepelné záření, jehož intenzita závisí na složení a teplotě. Ze všeho výše uvedeného lze shrnout, že celkový účinek atmosféry na měření povrchové teploty nejvíc závisí na vzdálenosti mezi termokamerou a objektem [2].



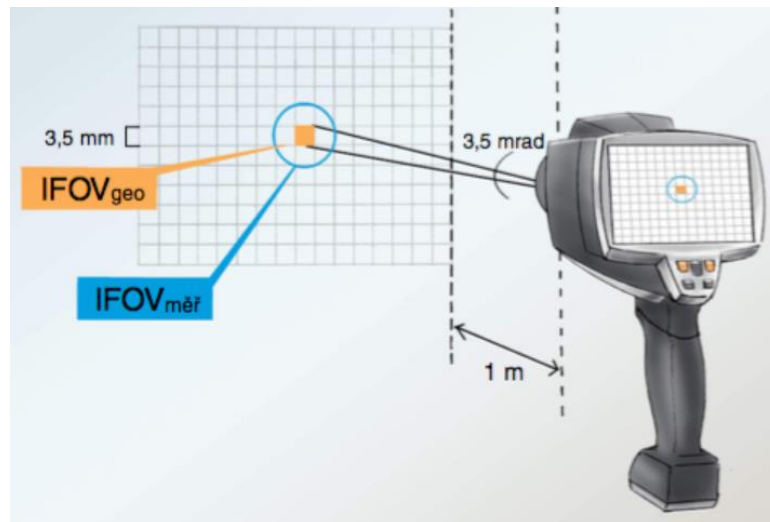
## 4.4 Parametry termokamery

Termokamera je téměř nejdůležitějším prvkem v procesu měření povrchové teploty. Proto je velmi důležité porozumět vlastnostem termokamer, jaké jsou hlavní rozdíly a kterou je třeba použít pro konkrétní úkol. Obvykle základními parametry při práci s termokamerou jsou zorné pole (FOV), rozlišení kamery, teplotní citlivost, přesnost, teplotní a spektrální rozsah [11].

- Zorné pole

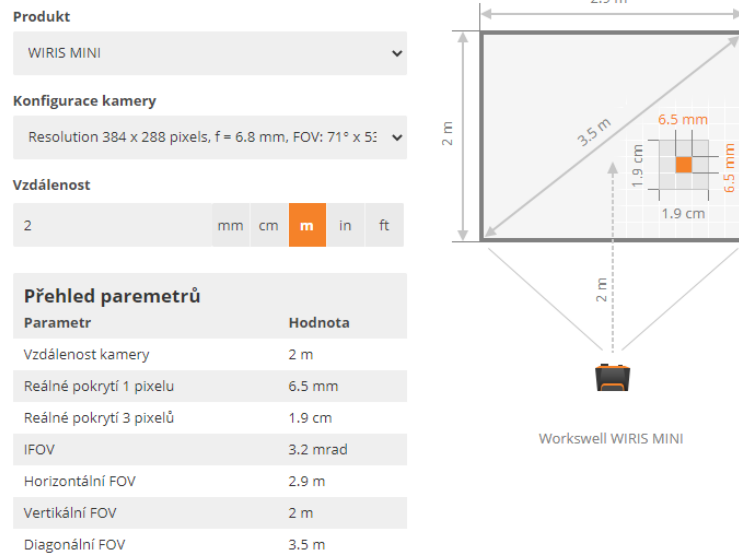
Zorné pole (FOV) je největší plocha, kterou je objektiv termokamery schopný zachytit (viz. obrázek 7). Je dáno vertikálním a horizontálním úhlem objektivu. Dalšími důležitými parametry jsou nejmenší měřitelný objekt ( $IFOV_{m\check{e}r}$ ) a nejmenší rozpoznatelný objekt ( $IFOV_{geo}$ ).  $IFOV_{geo}$  popisuje velikost jednoho pixelu v závislosti na vzdálenosti. Podíváme se na obrázek 7, kde je termokamera s prostorovým rozlišením objektivu 3,5 mrad umístěna ve vzdálenosti jednoho metru od měřeného objektu. Za těchto podmínek se nejmenší rozpoznatelný objekt ( $IFOV_{geo}$ ) s hranou 3,5 mm zobrazí na displeji jako jeden pixel. Pro co nejpřesnější měření by měl být nejmenší měřitelný objekt přibližně třikrát větší než nejmenší rozpoznatelný objekt [5].

$$IFOV_{m\check{e}r} \approx 3 \cdot IFOV_{geo}$$



Obrázek 7. Zorné pole jednoho jediného pixelu [5]

Pro víc názorné pochopení zorného pole a požadované vzdálenosti mezi termokamerou a měřeným objektem použijeme kalkulačor zorného pole na webových stránkách společnosti Workswell (viz. obrázek 8).



Obrázek 8. Kalkulátor zorného pole [x]

Nejprve si vybereme nějakou termokameru s přesně zadanými parametry, například WIRIS MINI, která má rozlišení 384x288 pixelů, ohniskovou vzdálenost 6,8 mm a zorné pole (FOV) 71°x 53°. Poté nastavíme vzdálenost, na kterou se plánuje měření, například 2 m. Jak je vidět z obrázku, prostor (FOV), který zachytne termokamera má rozměry 2 x 2,9m. Ale nejdůležitějším parametrem je úhel zorného pole, který spadá na jeden pixel iFOV, jehož hodnota v našem případě se rovná 3,2 mrad. Tato hodnota převedená na mm je pojmenovaná jako “reálné pokrytí 1 pixelu” a “ reálné pokrytí 3 pixelů”. To vlastně znamená, že tato kamera ve vzdálenosti 2 metrů je schopna rozpoznat nejmenší objekt o velikosti 6,5 mm. Ale přesně změřit teplotu dokáže u objektu, minimální velikost, kterého je 1,9 cm [12].

- Rozlišení kamery

Rozlišení je velmi důležitým parametrem při volbě termokamery. Jsou k dispozici termokamery s rozlišením od 60 x 60 až do 1280 x 960 pixelů. Samozřejmě výběr závisí na úkolu a oblastí použití. Vysoké rozlišení nám umožňuje obdržet kvalitnější obraz, mít větší měřený prostor a dostat se na nejvyšší přesnost měření. Vzhledem k tomu, že termografie se používá v mnoha různých oblastech, dost často přesnost především znamená bezpečnost. Běžně pro profesionální použití postačuje termokamera s rozlišením 640 x 480 pixelů, která zvládne většinu požadovaných úkolů. Například, pokud je potřeba přesně změřit teplotu ne v určité oblasti povrchu, ale v konkrétním bodě [11].

- Teplotní citlivost

Teplotní citlivost ukazuje na schopnost termokamery detekovat nejmenší teplotní rozdíl na povrchu měřeného objektu. Vyšší citlivost znamená, že termokamera dokáže rozpoznat menší rozdíl

teplot. Hodnota rozdílů teplot se udává buď ve stupních Kelvina nebo ve stupních celsia. U teplotně nejcitlivějších termokamer tato hodnota dosahuje až na 0,015 °C [11].

- Přesnost samotné termokamery

Termokamera, stejně jako jakékoliv jiné zařízení, má svou vlastní chybu měření. U moderních termokamer vlastní nepřesnost stanoví kolem  $\pm 2 \%$  nebo  $\pm 2^\circ\text{C}$ . Výsledek je pak závislý na tom, která z těchto hodnot je větší [11].

- Teplotní a spektrální rozsah

- Teplotní rozsah ukazuje, jakou minimální a maximální povrchovou teplotu dokáže změřit termokamera.
- Spektrální rozsah ukazuje v jak velkém rozsahu vlnových délek termokamera dokáže detekovat infračervené záření [11].

Všechny termokamery jsou rozděleny podle spektrálního rozsahu, ve kterém měří. Jsou to infračervené záření s krátkou vlnovou délkou (SWIR) s rozsahem 0,9-1,7  $\mu\text{m}$ , se střední vlnovou délkou (MWIR) s rozsahem 3,0-5,0  $\mu\text{m}$  a s dlouhou vlnovou délkou (LWIR) s rozsahem 8,0-14,0  $\mu\text{m}$ . Termokamery SWIR mají velmi úzké zaměření, například se používají při zobrazování denního světla hvězd kvůli schopnosti zachytit odražené světlo s maximálním slunečním osvětlením. Termokamery MWIR jsou důležité při detekci úniků plynu, které nejsou viditelné pro lidské oko. Také se používají, když detekce je důležitější než přesná teplota. Termokamery LWIR jsou nejpoužívanější a jsou primárními zařízeními v praxi kontroly teploty [22].

## 5. Aktivní termografie

### 5.1 Úvod

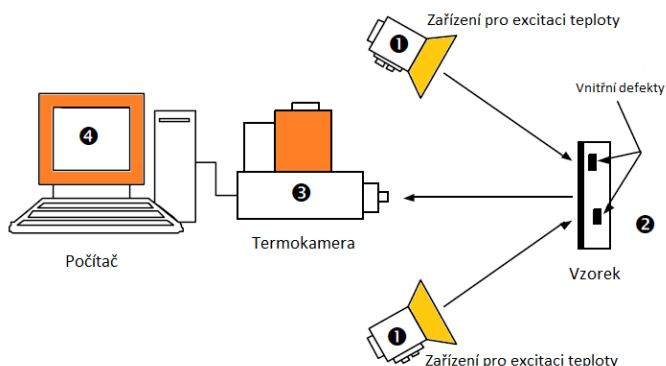
Infračervená termografie je rozdělena do dvou hlavních metod: pasivní a aktivní. Pasivní metoda je založena na měření a zobrazování teplotních polí na povrchu měřených objektů. Říká se tomu "pasivní", protože v této metodě se pro měření a analýzu používá pouze vlastní tepelné záření vyzařované měřeným objektem. U této metody je analýza založená hlavně na povrchové teplotě, konkrétněji na rozdílu teplot naměřených a přípustných. Pasivní metoda je nejpoužívanější v infračervené termografii, uplatnila se v mnoha oblastech a je mnohem jednodušší než aktivní. Dále se budeme podrobněji zabývat vším co se týká aktivní termografie [2].

Aktivní termografie je metodou nedestruktivního testování, kde se navíc používá externí zdroj energie. Je založena na tom, že externí zdroj ohřívá měřený objekt a pak existence defektů a nehomogenit způsobí narušení tepelného pole. Tyto změny se pak projevují jako teplotní rozdíly na povrchu testovaného vzorku, které se dá změřit pomocí termokamery. Hlavní rozdíl mezi aktivní a

pasivní metodou je v tom, že aktivní metoda umožňuje 'se podívat' dovnitř zkoumaného objektu, tj. dokážeme zanalyzovat nejen povrch, ale i celou vrstvu měřeného objektu. Je to něco podobného jako rentgenová defektoskopie [13].

## 5.2 Princip metody aktivní termografie

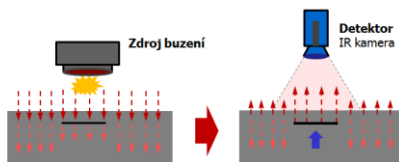
Klasický model pro měření metodou aktivní termografie se skládá ze čtyř hlavních komponent (viz obrázek 9): měřený vzorek s možnými vnitřními defekty 2, termokamera pro měření teplotního rozdílu na povrchu 3, externí zdroj energie pro zahřátí vzorku 1 a vlastně počítač pro konečné zpracování a zobrazení termogramu 4.



Obrázek 9. Konfigurace systému pro aktivní termografii [14]

Nejprve zařízením pro excitaci teploty 1 se vysílá energie na povrch vzorku 2. Trvání tohoto procesu je především závislé na metodě excitace a vlastnostech materiálů, ze kterých je vyroben měřený objekt. Poté, co je energie pohlcena objektem, přeměňuje se na tepelnou, která se šíří po celém objemu tělesa. Jakmile tepelná vlna narazí na nějaký defekt nebo nehomogenitu, tak dojde ke změně rychlosti této vlny. V následku dostaneme to, že teplota na povrchu v místech, která odpovídají umístění defektů, se bude lišit od nedefektních míst. Teplota může být vyšší nebo nižší, a to záleží na typu a vlastnostech samotného defektu a měřeného objektu [14].

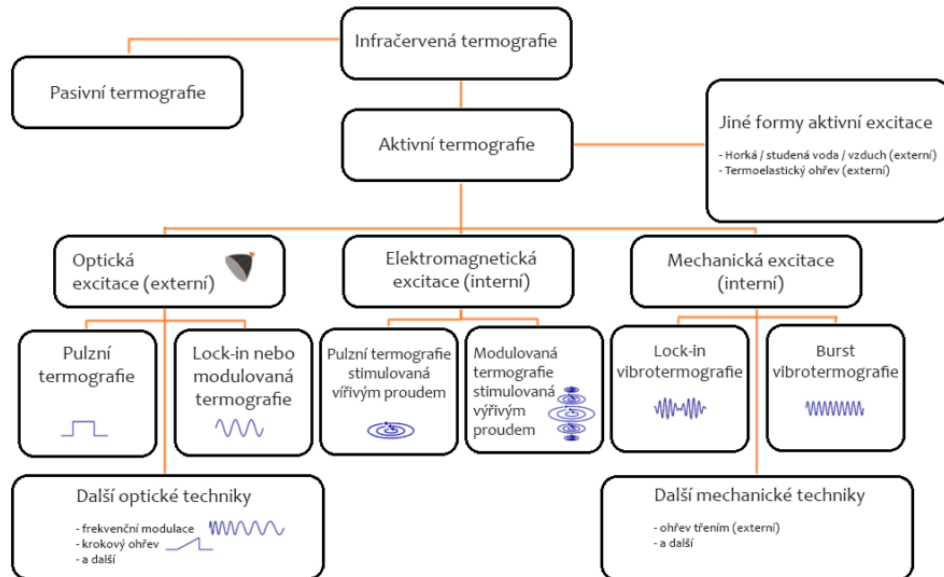
Průběh teplotních změn na povrchu je zaznamenán pomocí termokamery 3. Na výsledný obraz rozdílu teplot přijdeme pomocí vytvoření sekvence termogramů a její následného zpracování. Sekvence termogramů je dána 3 D maticí, kde souřadnice X a Y jsou vertikální a horizontální polohy pixelů, a souřadnice Z je daná časovými intervaly mezi vytvořením termogramů. Existuje několik vhodných metod pro zpracování 2D signálů, které podrobněji prodereme později.



Obrázek 10. Reakce defektu na zdroj buzení a vliv defektu na vyzářování na povrchu [14]

## 5.3 Metody excitace aktivní termografie

Aktivní termografie je rozdělena do tří hlavních bodů podle metod excitace měřeného objektu: optická, elektromagnetická a mechanická. Zároveň každá z těchto metod je navíc rozdělena podle techniky tepelné stimulace (viz. obrázek 11).



Obrázek 11. Rozdělení metod aktivní termografie [14]

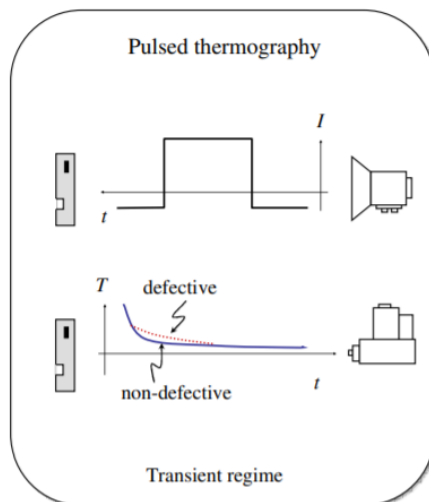
### 5.3.1 Optická excitace

Tato metoda je založena na bezkontaktním optickém ohřevu zkušební vzorku. Zdrojem optického signálu může být například halogenová lampa (periodický signál, lock-in termografie), výkonový blesk (realizující tzv. Dirakov impuls), infračervené záření lampy (realizující tzv. jednotkový skok, pulzní termografie) a další. Povrch objektu je stimulován světelnou energií, která se při kontaktu s povrchem promění v tepelnou. Teplo se šíří vedením po celém objemu tělesa a jakmile se tepelná vlna narazí na nějaký defekt nebo nehomogenitu, tak dojde ke změně její rychlosti, která se buď zvýší nebo sníží v závislosti na vlastnostech vzorku a samotného defektu. Metoda optické excitace je nejpoužívanější metodou ohřevu v aktivní termografii. Je to dáno relativní jednoduchostí těchto zařízení ve srovnání s mechanickými a elektromagnetickými a tím, že není nutný fyzický kontakt mezi objektem a zdrojem excitace (bezkontaktní metoda) [14].

#### ● Pulzní termografie (PT)

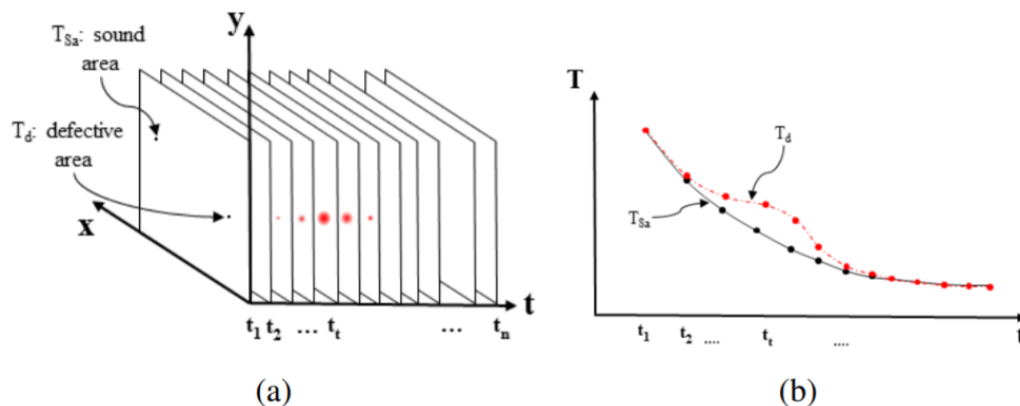
PT je jednou z nejpoužívanějších metod tepelné stimulace v aktivní termografii. Je založená na rychlém ohřevu povrchu zkušební vzorku vysoce intenzivním světelným pulzem a následném sledování křivky chlazení v každém bodě povrchu pomocí termokamery (viz. obrázek 12). Doba trvání pulzu je daná tepelnou vodivostí materiálu, v řádech milisekund u materiálu s vysokou

hodnotou tepelné vodivosti (např. kovy), a v řádu sekund pro materiály s nízkou hodnotou tepelné vodivosti, jako jsou plasty a kompozitní materiály [14].



Obrázek 12. Experimentální konfigurace pulzní termografie. Modrá křivka – chlazení nepoškozené oblasti, červená křivka – chlazení v místě nad defekty [15]

Vysíláním pulzu se tepelná vlna začne šířit po celém objemu tělesa. Povrch se ochlazuje v důsledku šíření (vedení) tepelných vln do hloubky materiálu, jakož i v důsledku konvekce a radiačních ztrát. Pokud se pod povrchem vyskytne vada s odlišnými vlastnostmi, než má základní materiál, bude tepelná vlna odražena zpět na povrch a proces chlazení se v tomto bodě změní. Toto chování křivek povrchového chlazení je znázorněno na obrázku 13b. K řízení času mezi spuštěním tepelného pulzu a záznamem pomocí termokamery je zapotřebí synchronizační jednotka. Data se ukládají jako 3D matice (viz. obrázek 13a), kde souřadnice X a Y jsou vertikální a horizontální polohy pixelů, a souřadnice Z je daná časovými intervaly mezi vytvořením termogramů [15].

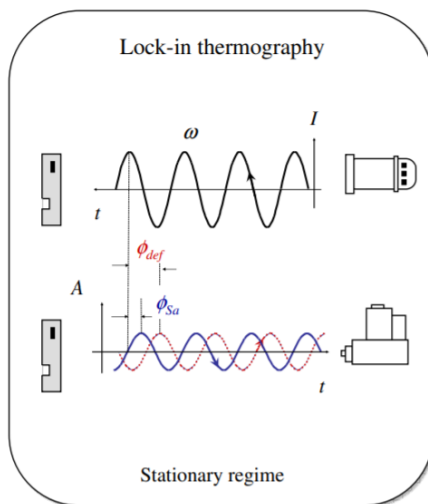


Obrázek 13. (a)-teplotní 3D matice, (b)-chování křivek povrchového chlazení [15]

#### ● Lock-in termografie (LT)

Lock-in je technikou aktivní termografie, kde povrch zkušebního vzorku je osvětlován periodickým zdrojem energie. Nejčastěji se používají halogenové žárovky nebo LED lampy. Periodická vlna se šíří zářením vzduchem, dokud nedosáhne povrchu vzorku, kde se promění na

tepelnou s následným šířením po celém objemu materiálu. Vnitřní defekty a nehomogenity způsobí změny v šíření tepla, což se projevuje změnami v amplitudě a fázi signálu odezvy na povrchu. Tepelná stimulace se obvykle provádí použitím sinusového tvaru buzení, i když jsou možné jiné periodické tvary vln. Výhodou použití sinusoid je to, že je zachována frekvence a tvar odezvy. Změnit se může pouze amplituda a fázové zpoždění vlny [15].



Obrázek 14. Experimentální konfigurace lock-in termografie. Modrá sinusoida – nepoškozená oblast, červená sinusoida – fázové zpoždění v místě nad defekty [15]

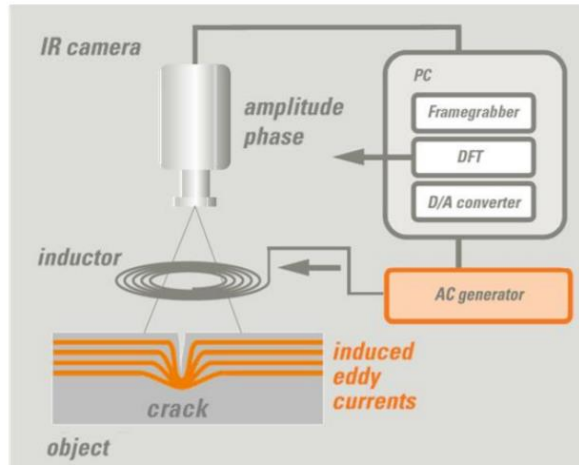
Na rozdíl od PT, pro kterou je dostupná široká škála technik zpracování, pro data LT se používá jen několik technik zpracování signálu. Nejpopulárnější jsou čtyřbodová metodika pro sinusovou stimulaci a regrese nejmenších čtverců [15].

#### ●Krokový ohřev

Aktivní termografie krokovým ohřevem má v podstatě stejný princip jako pulzní termografie. Hlavní rozdíl je v délce pulzu, která je řádově delší, od několika sekund až několik minut. U této metody není potřeba tak výkonných budících zdrojů jako v PT. Další odlišnost od PT, kde sledujeme pouze křivku chlazení, je daná tím, že tepelný obraz povrchu je vyhodnocován jak během stimulačního pulzu, tak po jeho ukončení. Tato metoda rovněž umožňuje detekci hloubky defektu, ale opět obvykle pouze takových, které se vyskytují v blízkosti povrchu, umožňuje však kontrolu větších ploch ve srovnání s PT [14].

### 5.3.2 Elektromagnetická excitace

U této metody excitace probíhá pomocí indukčního ohřevu vzorku. Funkční princip je obecně založen na rozptýlení energie ze ztrát vířivých proudů indukovaných ve vzorku. Na obrázku 15 je znázorněn příklad zkušebního nastavení indukčně excitované termografie používané pro detekci únavových trhlin. Řídící a měřicí počítač řídí měření, zaznamenává obrazy termokamery a spouští synchronizované signály ovládající indukční generátor [16].



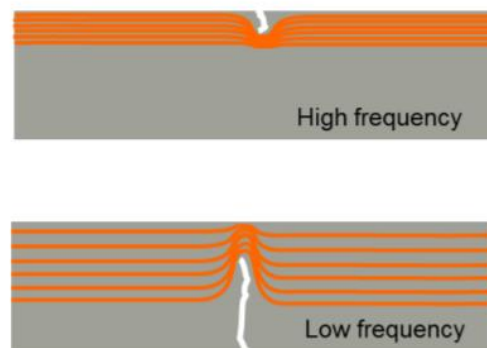
Obrázek 15. Schéma indukční excitace pro detekci trhlin [16]

Střídavé magnetické pole generované induktorem indukuje vířivé proudy ve vzorku. Princip detekce trhlin je založen na tom, že na špičkách a v základě trhlin dochází ke zúžení vířivých proudů, čímž se zvětšuje jejich hustota. Podle čeho se zvyšují i místní elektrické ztráty. V důsledku toho se v těchto oblastech vzorek ohřívá výrazně silněji (viz. obrázek 15). Změna výsledného rozložení povrchové teploty se zaznamenává pomocí termokamery, stejně jako u ostatních metod. Stejně jako v případě optické a mechanické excitace může být indukční stimulace aktivována ve formě pulzů (pulzní termografie) nebo amplitudových modulací (lock-in termografie) [16].

Efektivní hloubka průniku vířivých proudů je omezená účinkem samoindukce a je definovaná hloubkou kůže  $\delta$  (skin depth). Hloubka kůže popisuje místo, kde je hustota vířivého proudu snížena na úroveň  $1/e$ . Hloubka pláště závisí na elektromagnetických vlastnostech ohřátého materiálu (elektrický odpor a magnetická permeabilita) a na indukční frekvenci. Na obrázku 16 je znázorněná závislost hloubky průniku vířivých proudů na volbě indukční frekvenci.

$$\delta_{ec} = \sqrt{\frac{\rho}{\mu_0 \mu_r \pi f}}$$

$f$  := eddy current frequency  
 $\mu_0$  := vacuum permeability  
 $\mu_r$  := relative magn. permeability  
 $\rho$  := electrical resistivity



Obrázek 16. Hloubka průniku vířivých proudů jako funkce indukční frekvence. Shora – vysoká frekvence, zdola – nízká frekvence [16]



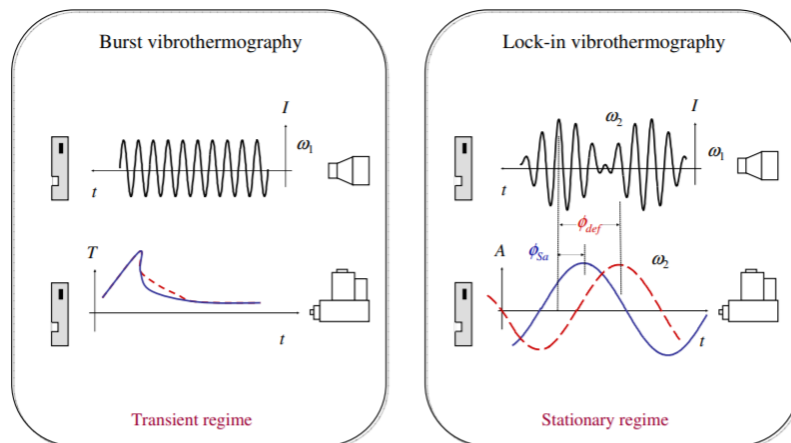
$$\delta_{ec} = \sqrt{\frac{\rho}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot \pi \cdot f}} \quad (7)$$

- $f$  je frekvence vířivých proudů
- $\mu_0$  je permeabilita vakua s hodnotou  $\mu_0 = 1,256\ 637\ 062\ 12(19) \cdot 10^{-6} [N \cdot A^{-2}]$
- $\mu_r$  je relativní magnetická permeabilita
- $\rho$  je elektrický odpor

### 5.3.3 Mechanická excitace

Metoda mechanické excitace, také známá jako vibrotermografie (VT) nebo ultrazvuková termografie, je realizovaná pomocí kontaktního předávání energie do vzorku prostřednictvím mechanických kmitů. U této metody stimulace vzorku probíhá vnitřně, kde mechanické vlny přenášené do měřeného objektu se šíří uvnitř ve všech směrech bez zahřívání povrchu vzorku, jako u optických metod. Převod na tepelnou energii probíhá v momentě, kdy se mechanické vlny narazí na vnitřní defekty, které produkují složitou kombinaci absorpce, rozptylu a disperze vln. Tepelné vlny se pak šíří vedením k povrchu, kde stejně jako u ostatních metod rozdíl teplot je zaznamenán termokamerou. Jelikož mechanické vlny se nešíří ve vakuu, potřebují přenosové médium. Přenášejí se rychleji v pevných látkách a kapalinách než vzduchem. Ke snížení ztrát se často používá spojovací médium mezi snímačem a vzorkem [15].

V podstatě existují dvě metody mechanické excitace, které jsou analogické dvěma hlavním metodám optické excitace. Na obrázku 17 jsou znázorněny metody pulsní (burst) a lock-in vibrotermografie, které úměrně odpovídají optickým metodám PT a LT. Jeden pulsní (burst) impulz je dán generováním skupiny krátkých impulzů, u lock-in metody je generován modulovaný ultrazvukový signál [15].



Obrázek 17. Experimentální konfigurace pulsní (burst) vibrotermografie (vlevo) a lock-in vibrotermografie (vpravo). Červená křivka-chlazení v místě nad defekty (pulsní), fázové zpoždění v místě nad defekty (lock-in) [15]

Ultrazvuková vlna je vytvářena převodníkem vyrobeným z hromady piezoelektrických prvků a koncentrována v titanovém rohu, který funguje jako kladivo. Roh snímače musí být přitlačen k povrchu, aby proces vazebného přenosu ultrazvuku byl co nejlepší. Doporučuje se použití speciálního materiálu mezi vzorkem a snímačem, a to nejen jako spojovací médium, ale také aby zabránil poškození vzorku [15].

## 5.4 Techniky zpracování 2 D signálu

S rozvojem aktivní termografie byly vyvinuty různé techniky následného zpracování obrazu. Hlavním účelem použití těchto technik je získání přesnějších údajů o defektech na základě naměřených dat. Například když nestačí jen vědět o přítomnosti vady, ale je nutná její charakterizace. Jednoduchá klasifikace je založená na skupinách zpracování obrazu, jako jsou techniky tepelného kontrastu, techniky založené na transformacích a techniky využívající statistické metody. Dále probereme z každé skupiny jednu techniku [18].

- Diferenciální absolutní kontrast (DAC)

Existují různé techniky používající princip tepelného kontrastu. Bez ohledu na rozdíly v definicích jsou všechny založeny na rozdílu teplot mezi nepoškozenými a vadnými oblastmi. Absolutní tepelný kontrast  $\Delta T(t)$  je obecně definován jako [17]:

$$\Delta T(t) = T_d(t) - T_{S_a}(t) \quad (8)$$

Kde  $T_d(t)$  je teplota pixelu nebo průměrná hodnota skupiny pixelů v oblasti nad defektem v čase  $t$ ,  $T_{S_a}(t)$  je teplota nepoškozené oblasti v čase  $t$ . Pokud  $\Delta T(t) = 0$ , nelze stanovit žádný defekt. V praxi jsou však nezpracovaná data kontaminována hlukem a jinými degradacemi signálu a je potřeba stanovit prahovou hodnotu detekovatelnosti. Hlavní nevýhodou klasického tepelného kontrastu je stanovení nepoškozené oblasti  $S_a$ , hlavně pokud se jedná o automatizovanou analýzu [17].

V metodě diferenciálního absolutního kontrastu (DAC) namísto hledání nezávadné oblasti, ideální teplota  $S_a$  v čase  $t$  se vypočítá lokálně za předpokladu, že na prvních několika obrázcích se tento místní bod chová jako  $S_a$  v rovnici (6), tudíž není tam žádný defekt. Jako první krok je potřeba definovat  $t'$  čas mezi tím, kdy byl spuštěn první pulz a v momentě, kdy se na termogramu objeví první viditelný defekt. V čase  $t'$  zatím nic nenasvědčuje na existenci defektu, proto lokální teplota pro  $S_a$  je úplně stejná jako u vadné oblasti [17]:

$$T_{S_a}(t') = T(t') = \frac{Q}{e\sqrt{\pi t'}} \Rightarrow \frac{Q}{e} = \sqrt{\pi t'} \cdot T(t') \quad (9)$$

Z toho vyplývá, že  $T_{S_a}$  lze vypočítat pro každý pixel v čase  $t$ . Přepíšeme a dosadíme  $T_{S_a}$  do rovnice (6) z čeho dostaneme, že diferenciální absolutní kontrast je definován jako:

$$\Delta T_{DAC} = T_a(t) - \sqrt{\frac{t'}{t}} \cdot T(t') \quad (10)$$

Skutečná měření se s postupem času liší od řešení poskytovaného rov. (8). Nicméně technika DAC je velmi účinná, hlavně pro měření tenkých součástí. [17].

- Rekonstrukce termografického signálu (TSR)

Rekonstrukce termografického signálu (TSR) je technika, která umožňuje zvýšit prostorové a časové rozlišení sekvence a současně snížit množství dat, s nimiž je třeba manipulovat. TSR je založená na předpokladu, že teplotní profily pro nezávadné pixely by měly sledovat křivku rozpadu danou jednorozměrným řešením Fourierovy rovnice, tj. rovnice (6), kterou se dá přepsat do logaritmického tvaru jako [17]:

$$\ln(\Delta T) = \ln\left(\frac{Q}{e}\right) - \frac{1}{2} \ln(\pi t) \quad (4) \quad (11)$$

Jak již bylo řečeno, rovnice (6) je pouze přibližným řešením Fourierovy rovnice. Aby se vešly termografická data, bylo navrženo použít polynom stupně P ve formě [17]:

$$\ln(\Delta T) = a_0 + a_1 \ln(t) + a_2 \ln^2(t) + \dots + a_p \ln^p(t) \quad (12)$$

Kde  $\Delta T$  je zvýšení teploty v závislosti na čase  $t$  pro každý pixel  $(i, j)$ .

Tepelné profily odpovídající nezávadným oblastem ve vzorku budou sledovat přibližně lineární pokles, zatímco tepelné chování defektní oblasti se bude lišit od lineárního. Na konci se celá surová sekvence termogramu zredukuje na snímky s koeficientem  $p + 1$ , ze kterých lze rekonstruovat syntetické termogramy [17].

- Pulzně-fázová termografie (PPT)

Pulzně-fázová termografie je technikou zpracování sekvencí termogramů, u které se data transformují z časové domény do frekvenční pomocí jednorozměrné diskrétní Fourierovy transformace (DFT) [17]:

$$F_n = \Delta t \sum_{k=0}^{N-1} T(k\Delta t) \exp\left(-\frac{j2\pi nk}{N}\right) = Re_n + jIm_n \quad (13)$$

Kde  $j$  je imaginární jednotka,  $n$  označuje přírůstek frekvence ( $n=0,1,\dots,N$ ),  $\Delta t$  je interval vzorkování,  $Re$  a  $Im$  jsou reálná a imaginární složka transformace.

V tomto případě se pro odhad amplitudy  $A$  a fáze  $\varphi$  použijí reálné a imaginární složky komplexní transformace [17]:

$$A_n = \sqrt{Re_n^2 + Im_n^2}; \quad \varphi_n = \tan^{-1} \left( \frac{Im_n}{Re_n} \right) \quad (14)$$

DFT lze použít na jakýkoli tvar vlny. Fázové profily pro povrchovou teplotu jsou antisymetrické a poskytují nadbytečné informace na obou stranách frekvenčního spektra. Fáze je pro NDE zvláště zajímavá, protože je méně ovlivněna než surová tepelná data působením prostředí, změnami emisivity, nerovnoměrným ohřevem, geometrií a orientací povrchu. Tyto fázové charakteristiky jsou velmi atraktivní nejen pro kvalitativní kontroly, ale také pro kvantitativní charakterizaci materiálů [17].

## 5.5 Aplikční využití

V poslední době aktivní termografie je nejpoužívanější metodou nedestruktivního testování. Některé důvody této popularity spočívají v tom, že se jedná o bezpečnou techniku, obvykle bezkontaktní a s vysokou rychlostí kontroly, která umožňuje kontrolu velkých ploch na místě bez nutnosti demontáže jakékoli součásti. Jak již víme aktivní termografie je rozdělená podle metod excitace, technik tepelné stimulace a technik zpracování obrazu. Každá z těchto metod má svou specifickou, výhody a nevýhody, a proto se volí pro každý konkrétní úkol.

V současné době optická excitace je nejpoužívanější metodou tepelného ohřevu. Hlavně kvůli tomu, že tato metoda je absolutně bezkontaktní, dostupnější a snadněji aplikovatelná než ostatní metody. Tato metoda by měla být docela dobrá při testování v sériové výrobě s velkými objemy, vysokou rychlostí výroby a s plně automatizovaným procesem. Mechanická excitace také používá v některých oblastech, například v leteckém průmyslu, je velmi rychlá a lze ji použít k ohřevu vzorků s poměrně velkou tloušťkou. Nicméně tato metoda není tak univerzální jako optická, protože existuje celá řada experimentálních aspektů, které je potřeba řešit při každém experimentu. Například tlak mezi rohem převodníku a vzorkem, kontaktní plocha mezi rohem a vzorkem a doba trvání excitace mají velký vliv na tepelnou odezvu. Čím déle snímač pracuje na povrchu, tím více tepla se uvolňuje na kontaktní ploše, což zvyšuje pravděpodobnost poškození. Indukční excitaci stejně nelze nazvat univerzální metodou, protože může být aplikována pouze na elektricky vodivé materiály a hloubka vířivých proudů je omezená. Ale tato metoda by mohla být ideálně aplikovaná k automatizovaným výrobním linkám v automobilovém průmyslu, kde indukčním ohřevem lze kovové součásti zahřívat selektivně s vysokou energetickou účinností.

Pulzní termografie (PT) je jednou z nejčastěji používaných metod tepelné stimulace. Kvůli vysoké rychlosti a velké ploše kontroly lze tuto metodu aplikovat v automobilovém nebo leteckém průmyslu pro práci s takovými materiály, jako jsou kovy, kompozity a polymery. Krátké zahřívání navíc zabraňuje poškození zkoumaného vzorku. Ale existuje i omezení, protože většinou je použitelná pouze k detekci defektů, které se vyskytují v blízkosti povrchu zkoumaného vzorku. Například v praktické části, kde zkušebním vzorkem byly izolované dveře s poměrně velkou

tloušťkou, se ukázalo, že tato metoda není vhodná. V takových případech lze použít metodu krokového ohřevu, kde jeden pulz je nahrazen sérií několika krátkých impulzů.

## 6. Praktická část

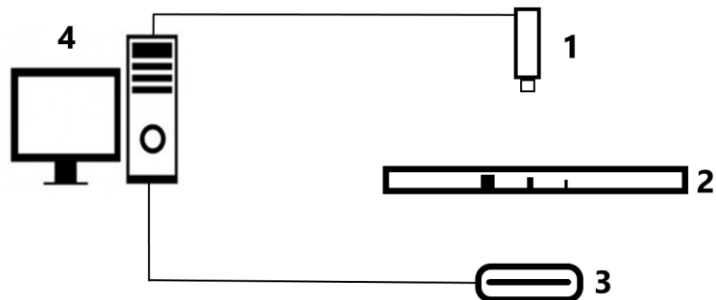
Jedním z hlavních úkolů této práce bylo v průběhu experimentálního měření otestovat jednu z metod aktivní termografie na předem připraveném vhodném zkušebním vzorku. Dalším úkolem bylo otestovat zvolenou metodu na dvou různých materiálech. Tato kapitola bude velmi stručně popisovat celý proces experimentu. Všechna měření byla provedena v laboratoři automatického řízení na FS ČVUT.

### 6.1 Přehled použitého pracoviště

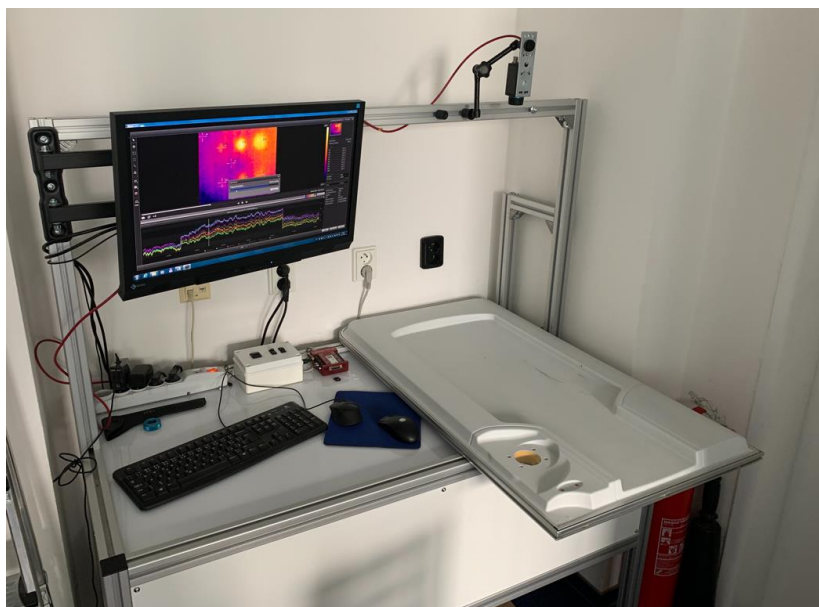
Jak již bylo zmíněno dříve, pro správné a kvalitní měření metodou aktivní termografie, musí být pracoviště vybaveno následujícími prvky: zařízení pro excitaci teploty, infračervená termokamera pro záznam teplotních rozdílů, zkušební vzorek, výpočetní technika a software pro záznam a zpracování naměřených dat.

#### 6.1.1 Návrh pracoviště

Na obrázcích 18 a 19 je znázorněno schematické a reálné rozestavění všech potřebných prvků pro provedení termografického měření. Uspořádání pracoviště bylo dáno předem připraveném místem určeným pro realizaci termografických zkoušek. Byla postavena speciální konstrukce tak aby zkušební vzorek se nacházel ve vodorovné poloze. Kolmo pod ním je umístěn excitační zdroj (stroboskop nebo halogenová lampa). Termokamera, propojená s počítačem přes rozhraní Ethernet, je připevněna k rámu pomocí držáku a je nasměrována kolmo ke zkušebnímu vzorku tak, aby objektiv byl schopen zaznamenat dvě řady udělaných defektů. Stroboskop je umístěn ve vzdálenosti 40 cm od povrchu, zatím co objektiv termokamery se nachází přibližně 55 cm daleko nad zkušebním vzorkem. Ovládání stroboskopu probíhá pomocí speciálně připraveného programu na počítači.



Obrázek 18. Schematický model pracoviště: 1 - termokamera, 2 - zkušební vzorek, 3 - excitační zdroj, 4 - počítač s nainstalovaným softwarem



Obrázek 19. Navržené termografické pracoviště

### 6.1.2 Termokamera

Pro naše účely bude použita termokamera *FLIR A5* z modelové řady *FLIR Ax5* nabízená společností *FLIR Systems*. Jedná se o malé stacionární termokamery umožňující záznam a streamování radiometrického videa v reálném čase s obrazovou frekvencí až 60 Hz, vysokým rozlišením 640x512 pixelů a velkou teplotní citlivostí 0.05 °C. Nicméně termokamera *FLIR A5* má nejnižší rozlišení z celé řady a má následující parametry:

- Rozlišení senzoru: 80x64 bodů
- Teplotní citlivost: 0.05 °C
- Teplotní rozsah: -40 °C až +550 °C
- Zorné pole: 44°x36°, 25°x20°
- Přesnost: ±5 °C
- Obnovovací frekvence: 60 Hz

- Spektrální rozsah: 7.5-13  $\mu\text{m}$
- Napájení přes Ethernet: Ano, IEEE 802.3af
- Rozměry: 106x40x43mm

Tato řada stacionárních termokamer FLIR přináší velmi malé rozměry a bezkonkurenční cenu, za kterou lze termokameru pořídit, integrovat do stávajícího systému a zvýšit tak výstupní kontrolu a kvalitu výrobku. Termokameru je možné napojit pomocí digitálních vstupů/výstupů či Ethernet rozhrání.



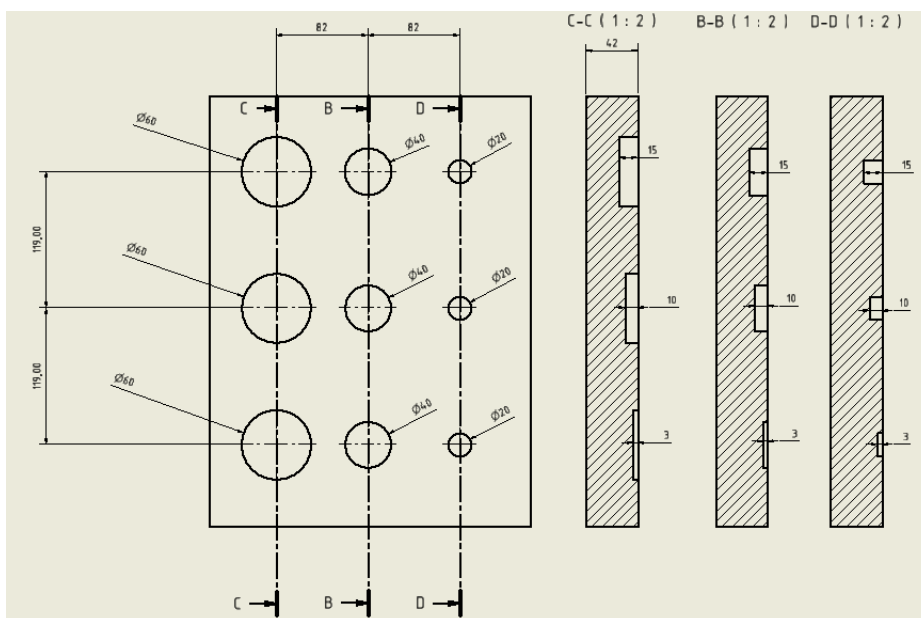
Obrázek 20. Termokamera FLIR A5

### 6.1.3 Zkušební vzorky

Jako hlavní zkušební vzorek byly použité izolované dveře (viz. obrázek 21). Konstrukčně jsou vyrobeny z plastu na jedné straně a kovového plechu na druhé. Prostor mezi pokrytím je vyplněn extrudovaným polystyrenem. Je to materiál z polystyrenové pěny s uzavřenou strukturou buněk a je určen k izolaci zateplení plochých střech a podlah. Pro vyzkoušení jedné z metod aktivní termografie byly z jedné strany pod plechovým pokrytím udělány defekty různých rozměrů (viz. obrázek 22). Jsou to 9 otvorů o průměrů 60, 40, 20 mm a hloubce 3, 10, 15 mm.



Obrázek 21. Zkušební vzorek – izolované dveře



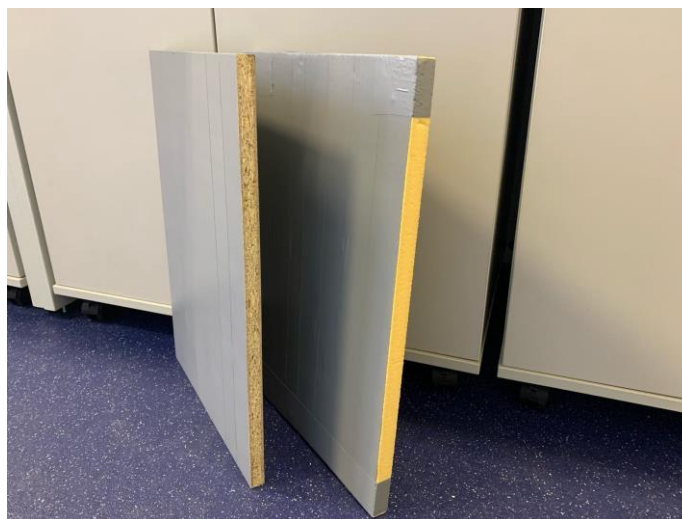
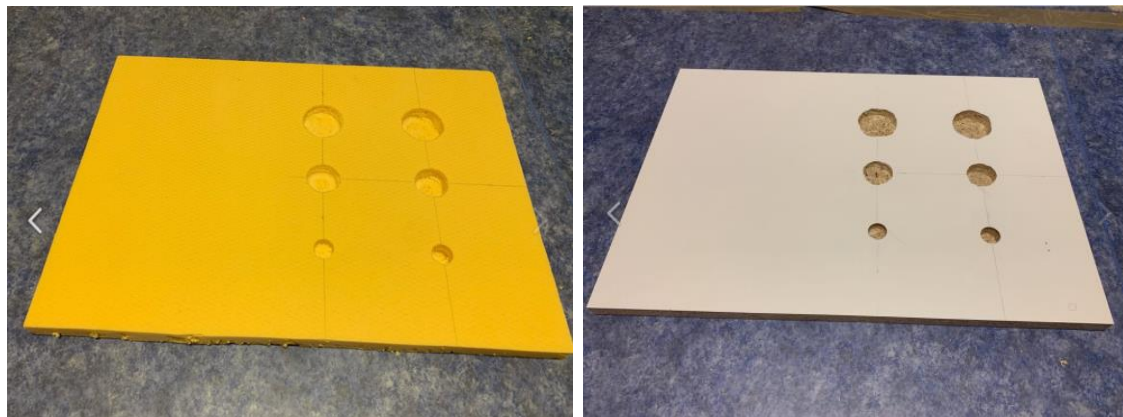
Obrázek 22. Schéma umístění otvorů ve zkušebním vzorku



Pro další náš úkol byly použity dva vzorky stejných rozměrů (500x350x20mm) z dřevotřísky a polystyrenu. Uspořádání otvorů je úplně stejné jako u prvního vzorku.

Rozměry otvorů:

- Průměr: 50 mm, 35 mm, 20 mm.
- Hloubka: 14 mm, 9 mm.



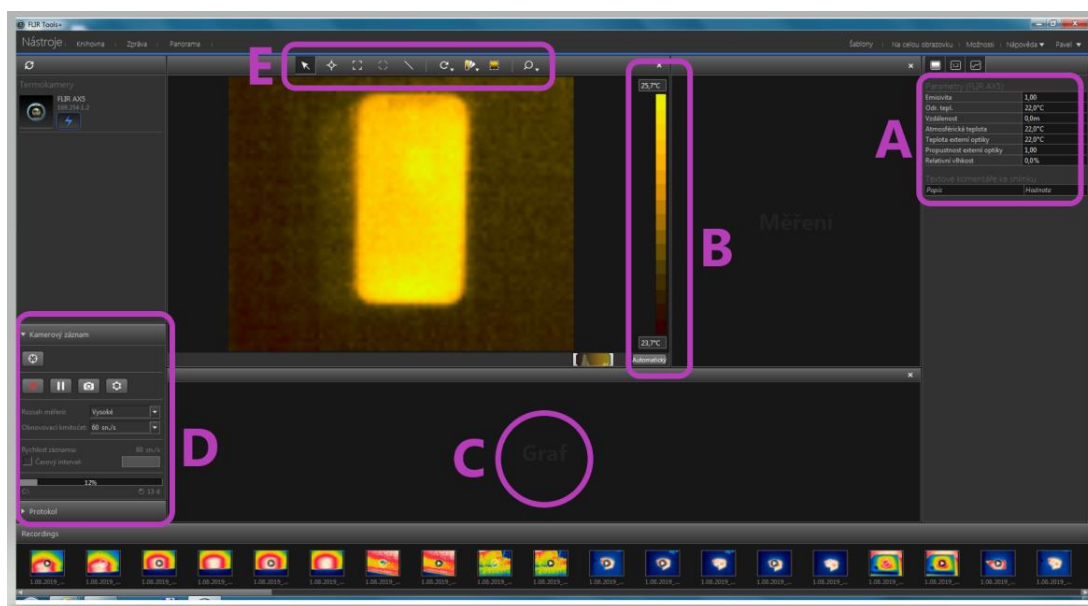
Obrázek 23. Zkušební vzorky – deska z dřevotřísky a polystyrenu

#### 6.1.4 Výpočetní technika a software

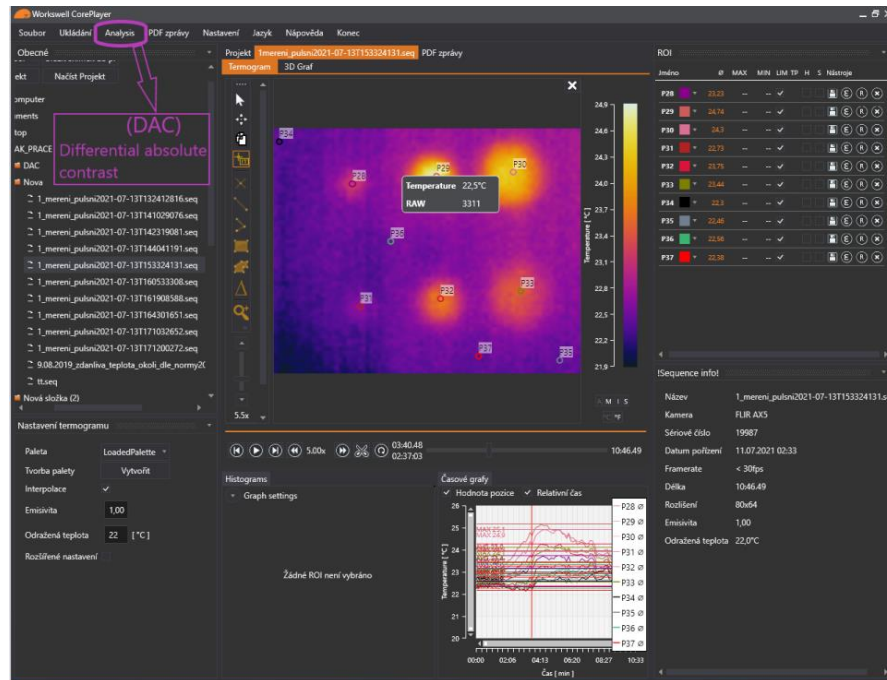
K práci s termokamerou a zpracování naměřených dat byly použité školní a vlastní počítač s nainstalovaným operačním systémem Windows. Při zakoupení termokamery FLIR byl poskytnut od dodavatele i software, se kterým pracuje termokamera. Pro záznam dat byly použité programy FLIR Tools a FLIR Tools+. Základní funkce FLIR Tools jsou následující: editace/úprava snímku (termogramů) z termokamery, tvorba jednoduchých protokolů ve formátu PDF, export snímku z termokamery na disk počítače. Rozšířená verze FLIR Tools+ pak navíc nabízí tvorbu rozsáhlých a uživatelsky definovaných protokolů v prostředí MS Word a záznam a přehrávání radiometrického

video. Navíc pro zpracování pořízených dat byly použity MS Excel a Workswell CorePlayer. Tento software zahrnuje v sobě všechny funkce výše uvedeného FLIR Tools, nicméně je mnohem kvalitnější, disponuje bohatší funkcí a používá se pro složitější úkoly. Přes to všechno bude v naší práci sloužit pouze k zpracování 2 D signálu (viz. obrázek 25). Pro používání programu nebyl zakoupen licenční klíč, ale byla použita patnáctidenní testovací verze.

Na obrázku 24 je znázorněna pracovní plocha programu FLIR Tools+. Program umožňuje nám nastavit parametry měření (A), mezi které jsou emisivita, odražená zdanlivá teplota, vzdálenost mezi termokamerou a vzorkem, atmosférická teplota, teplota externí optiky, propustnost externí optiky a relativní vlhkost. V rámečku (D) jsou možnosti k provedení kalibrace termokamery, zahájení záznamu, udělení snímků, změně rozsahu měření a vzorkovací frekvence. Při práci s termogramem se dá udělat graf změny teploty (C) konkrétního bodu nebo vybrané oblasti. Další možnosti program nabízí přímo pro práci s termogramem, například pomocí bodu nebo vybrané oblasti (E) se dá do grafu (C) zobrazit průběh teploty v konkrétním místě. Pro nejlepší přehled rozložení povrchové teploty si můžeme vybrat nejvhodnější paletu, v jejíchž barvách bude vykreslen termogram nebo použít ruční nastavení horní a spodní hranice zobrazovaných teplot (B).



Obrázek 24. Pracovní plocha programu FLIR Tools+

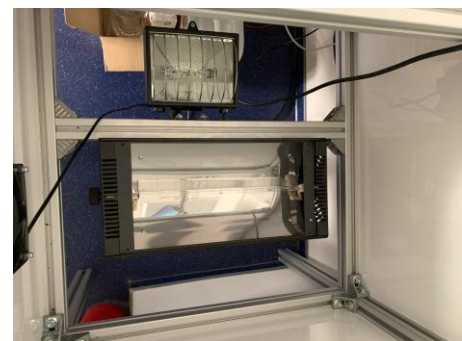


Obrázek 25. Pracovní plocha programu Workswell CorePlayer

### 6.1.5 Excitační zdroj

V první řadě je třeba rozhodnout, kterou z dostupných metod excitace použijeme. Pro toto měření bude zvolená optická excitace kvůli své jednoduchosti, a hlavně kvůli dostupnosti zařízení. V školní laboratoři jsou k dispozici halogenová lampa a stroboskop. Vybraný zkušební vzorek je vyroben z materiálu s nízkou tepelnou vodivostí. A proto bude použit stroboskop, jelikož má mnohem větší výkon, tudíž i doba ohřevu bude mnohem kratší. Ovládání stroboskopu bude probíhat pomocí programu Thermo Control Panel, který je k dispozici na školním počítači.

Stroboskop *Eurolite Superstroke 2700* má výkon 1500 W, frekvence 12(záblesků/s), intenzita (0-100 %), hmotnost 4,5 kg.



Obrázek 26. Stroboskop *Eurolite Superstroke 2700*

## 6.2 Testování metody

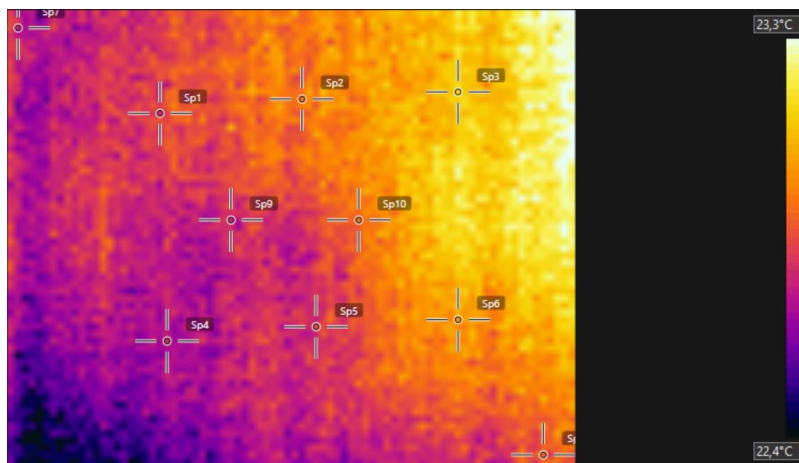
Původně se na základě prostudované teorie plánovalo, že k excitaci zkušební vzorku bude použita metoda pulzního ohřevu. Ale jak se ukázalo v praxi, po několika udělaných testovacích měřeních, tato technika není příliš vhodná pro náš zkušební vzorek. První projevy teplotních změn na povrchu jsou pozorovány po poměrně dlouhé době. Někdy to trvalo tak dlouho, že práce stroboskopu byla přerušena pojistkou. Dveře mají docela velkou tloušťku, většinu, z které zabírá materiál s nízkou tepelnou vodivostí. Právě kvůli tomu použitím metody pulzního ohřevu je docela problematicky dosáhnout potřebného výkonu pro kvalitativní excitaci daného zkušební vzorku. V našem případě vhodnější volbou bude použití termografii s krokovým ohřevem, kde jeden dlouhý pulz nahradíme sérií několika krátkých záblesků.

### 6.2.1 Postup měření

Jakmile jsme přesvědčeni o připravenosti pracoviště, může vlastně začít samotné měření. Zkušební vzorek umístíme na předem určené místo podle obrázku 19. Poté spustíme program FLIR Tools, kde po zapnutí termokamery zkontrolujeme, jestli objektiv kamery míří přesně na oblast, kde se nacházejí defekty. V tomto měření nás nezajímá přesná teplota vzorku. Hlavní informace pro zpracování jsou získány z tepelného kontrastu na povrchu mezi vadnými a nepoškozenými zónami. Proto by bylo možné zanedbat parametry měření jako jsou emisivita, odražená zdánlivá teplota, vzdálenost, teplota okolí atd. Ale pro kvalitativní měření podle postupu, který byl probraný v teorii, budou tyto parametry změřeny a přesně nastaveny v programu. Další důležitá věc je kalibrace termokamery (NUC). NUC upravuje drobné odchylky detektoru. Vlastní teplo termokamery může rušit naměřené hodnoty teploty. Pro zlepšení přesnosti termokamera měří infračervené záření ze své vlastní optiky a poté upravuje obraz na základě těchto hodnot. Máme k dispozici tlačítko k provedení kalibraci a je doporučeno jej provést ručně před zahájením měření. Avšak po určité době termokamera provede automatickou kalibraci, což v důsledku může negativně ovlivnit graf průběhu teploty vybraných bodů. Vzhledem k tomu, že naše měření bude probíhat poměrně dlouho, pak se to s největší pravděpodobností stane. Bez ohledu na to, budeme se tímto problémem zabývat již během zpracování naměřených dat. V nastaveních termokamery si zvolíme rozsah měření a vzorkovací frekvence na "nízké" a 30 sn/s úměrně. Dalším důležitým krokem je zajistit, aby zkušební vzorek byl v klidovém stavu, tj. aby teplota na celém povrchu byla co nejvíc rovnoměrná. Případně počkat až se teplota rovnoměrně ustálí na celém povrchu. Pro ovládání stroboskopu zapneme program Thermo Control Panel, zmačkneme tlačítko Long pulse a nastavíme potřebnou frekvenci jednotlivých záblesků. V tomto okamžiku je vše připraveno k zahájení měření. Současně spustíme nahrávání záznamu a tlačítkem Long pulse zapneme stroboskop. Po uplynutí předem stanovené doby vypneme stroboskop a záznam dat pokračuje do ustálení teploty vlastního chladnutí vzorku. V tuto chvíli máme všechna potřebná data, která budeme následně zpracovávat a vyhodnocovat.

## 6.2.2 Zpracování naměřených dat

Začneme tím, že nepodařilo se dosáhnout, aby ustálená teplota na celém povrchu zkušebního vzorku byla stejná (viz. obrázek 27). Rozdíl je přibližně o jeden stupeň mezi pravou horní částí termogramu a levou dolní. Pracoviště je uspořádáno tak, že část, kde je teplota vyšší, je poblíž k rohu mezi dvěma stěnami, kde není skoro žádný vliv prostředí, zatímco chladnější oblast je blízko celé sady zapnutých elektronických zařízení. Takže pravděpodobně je to dáno nehomogenitou senzoru termokamery.



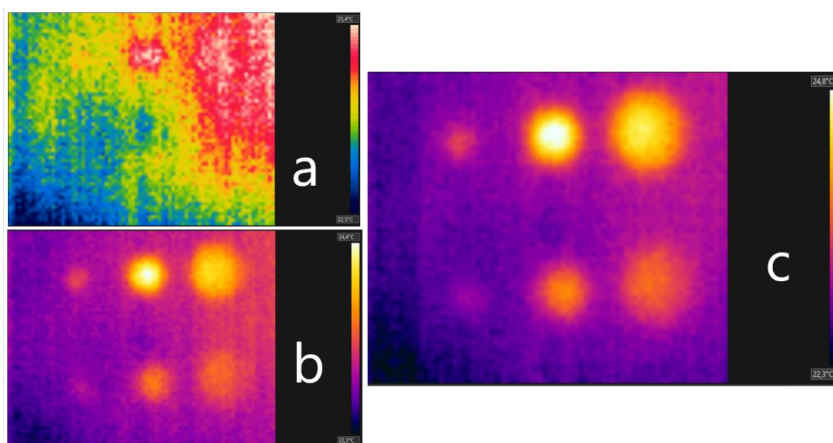
Obrázek 27. Nejvíc dosažená ustálená teplota povrchu vzorku

Bylo rozhodnuto provést čtyři měření, kde u každého bude nastavená jiná frekvence jednotlivých záblesků a doba ohřevu vzorku. Během všech měření jako první se objevily na termogramu defekty o rozměrech 60 a 40 mm a hloubce 15 mm. Dále současně se objevily tyto otvory: průměr 20 mm/hloubka 15 mm a průměry 60 a 40 mm o hloubce 10 mm. Jako poslední se zviditelnil otvor o průměru 20 mm a hloubce 10 mm. U všech měření tento otvor je nejhůř viditelný, tepelný kontrast v místě defektu je minimální. Na následujících obrázcích jsou pro každé měření znázorněny termogramy v době, kdy se objevily první defekty, viditelnost všech defektu a přibližně nejlepší kontrast všech otvorů.

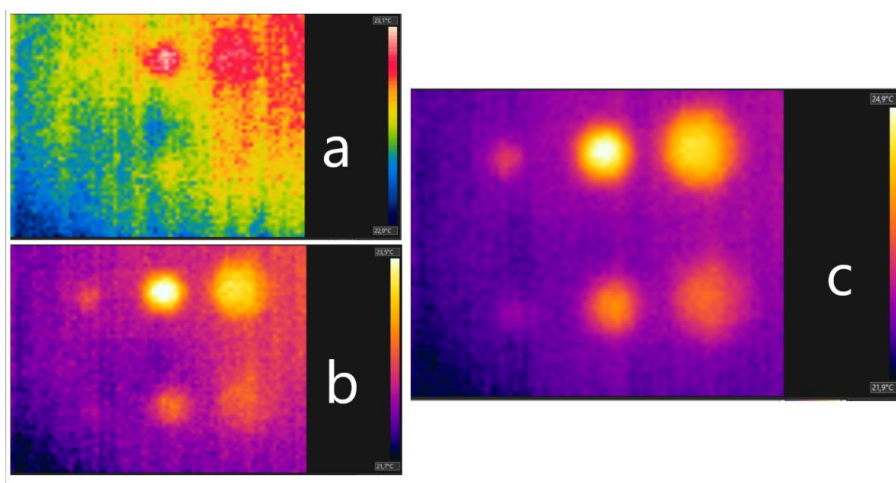
- První měření: Long pulse uptime 35 %, doba ohřevu 4 minuty, měření trvalo 13 minut, první vady se objevily po 1 minutě 45 sekundách od začátku ohřevu. Každý z defektů byl viditelný po 2 minutách 50 sekundách od začátku ohřevu.
- Druhé měření: Long pulse uptime 50 %, doba ohřevu 2 minuty 45 sekund, měření trvalo 10 minut 45 sekund, první vady se objevily po 1 minutě 25 sekundách od začátku ohřevu. Každý z defektů byl viditelný po 2 minutách 15 sekundách od začátku ohřevu.
- Třetí měření: Long pulse uptime 60 %, doba ohřevu 1 minuta, měření trvalo 7 minut, první vady se objevily po 15 sekundách od začátku vlastního chlazení. Každý z defektu byl viditelný po 1 minutě 10 sekundách od začátku vlastního chlazení.

- Čtvrté měření: Long pulse uptime 40 %, doba ohřevu 2 minuty, měření trvalo 9 minut 25 sekund, první vady se objevily po 1 minutě 30 sekundách od začátku ohřevu. Každý z defektu byl viditelný po 20 sekundách od začátku vlastního chlazení.

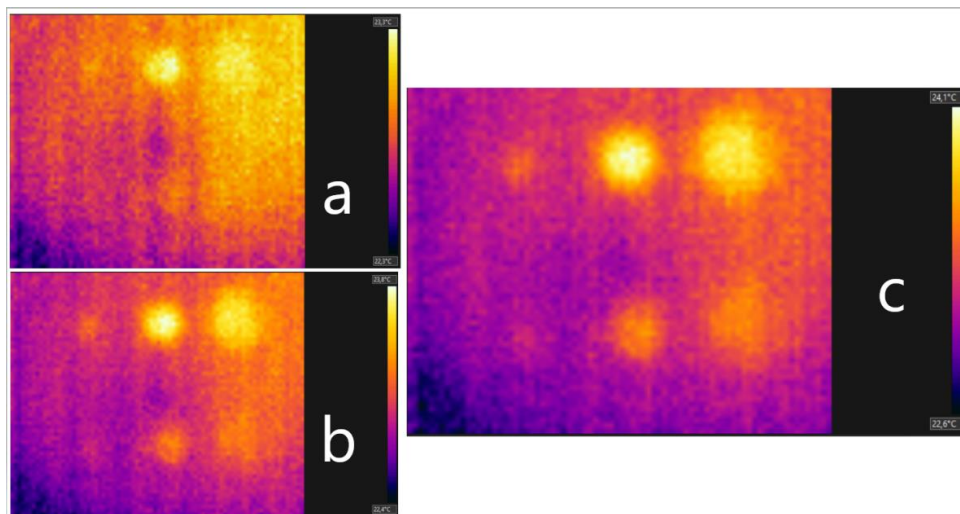
Bohužel se nepodařilo vyzkoušet stroboskop s nastavením frekvenci jednotlivých záblesků vyšší než 60 %, protože pojistka takové zatížení už nevydrží. Jak je vidět z rozepsaných výsledku, během prvního a druhého měření se všechny defekty objevily ještě během ohřevu, zatímco u třetího a čtvrtého již během vlastního chlazení. Nicméně nejúčinnějším podle doby ohřevu a získaných výsledků bylo druhé měření. Právě z tohoto měření data budou následně zpracovávána a analyzována.



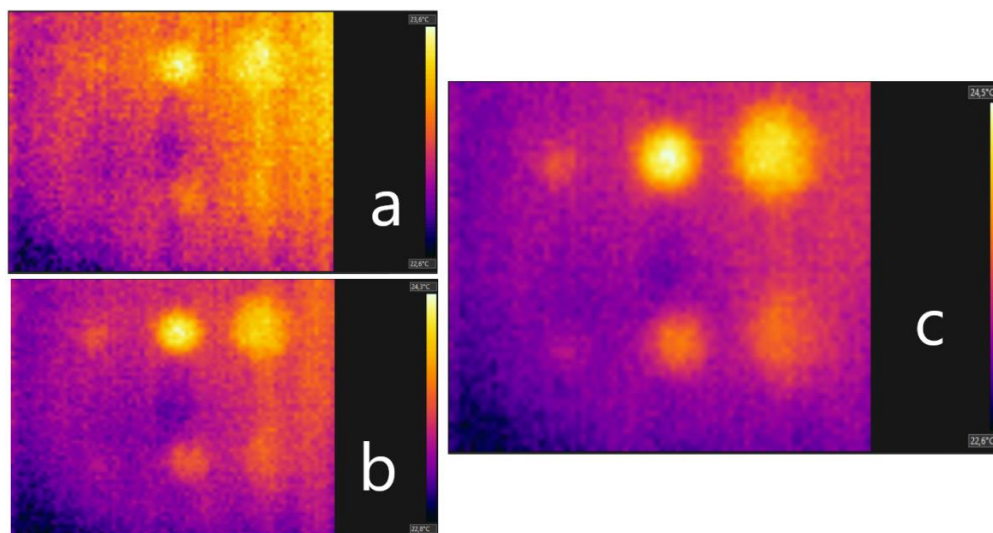
Obrázek 28. První měření (Long pulse uptime 35 %). a – viditelnost prvních otvorů, b – viditelnost všech otvorů, c – nejlepší viditelnost otvorů



Obrázek 29. Druhé měření (Long pulse uptime 50 %). a – viditelnost prvních otvorů, b – viditelnost všech otvorů, c – nejlepší viditelnost otvorů



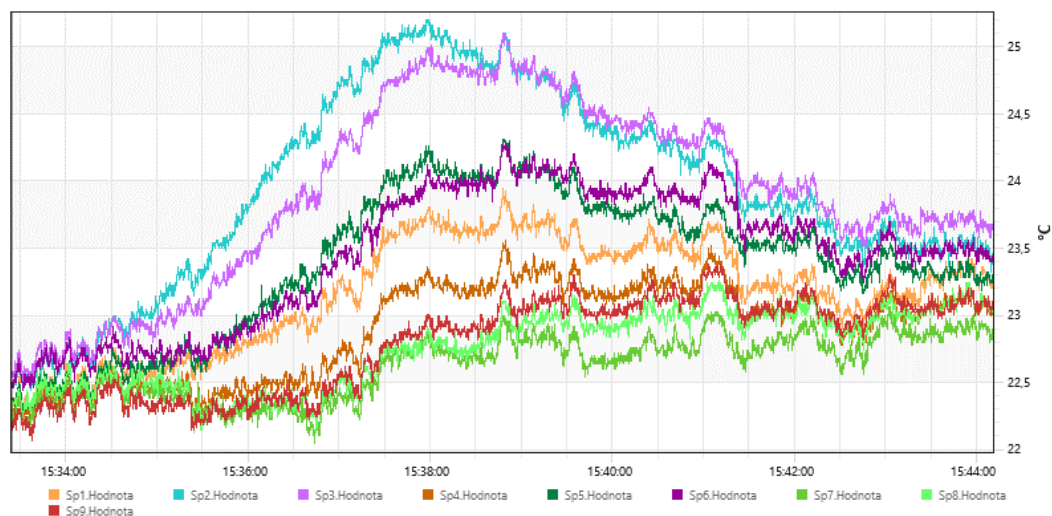
Obrázek 30. Třetí měření (Long pulse uptime 60 %). a – viditelnost prvních otvorů, b – viditelnost všech otvorů, c – nejlepší viditelnost otvorů



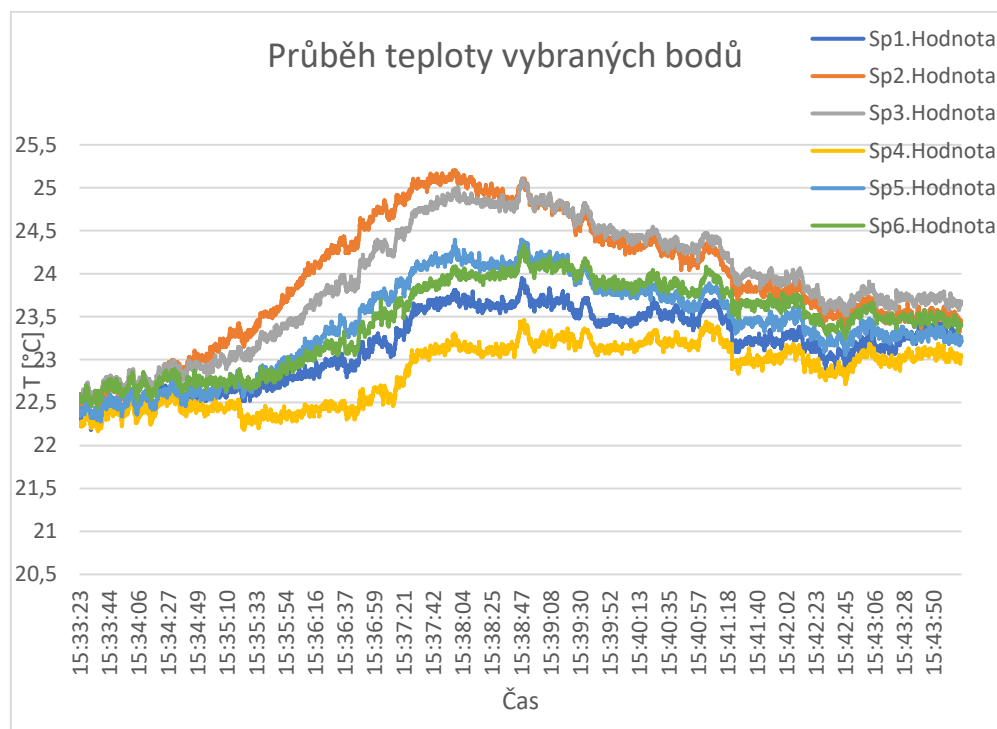
Obrázek 31. Čtvrté měření (Long pulse uptime 40 %). a – viditelnost prvních otvorů, b – viditelnost všech otvorů, c – nejlepší viditelnost otvorů

Po provedení měření máme záznam dat, se kterými můžeme pracovat dál. V programu FLIR Tools otevřeme uložený video záznam a v místech nad defekty přidáme bodové měření. Tyto body zobrazují střední teplotu několika pixelů ve vybraných místech. Program umožňuje sestavit graf průběhu teploty ve vybraných bodech, případně můžeme okopírovat data a zpracovávat graf v jiném prostředí. Názvy bodů odpovídají následujícím otvorům: Sp1-otvor 20 mm průměr/15 mm hloubka,

Sp2- 40 mm/15 mm, Sp3- 60 mm/15 mm, Sp4-20 mm/10 mm, Sp5 – 40 mm/10 mm, Sp6 – 60 mm/10 mm. Z grafu je vidět, že každá čára průběhu teploty je doprovázená značnými skoky. Jak již bylo řečeno je to kvůli automatické kalibraci termokamery. Nicméně graf průběhu teploty je úplně v souladu se sekvencí, ve které byly defekty pozorovány, a s tím, jak jasně je viditelný každý z nich.



Obrázek 32. Průběh teplot vybraných bodů (v prostředí FLIR Tools)



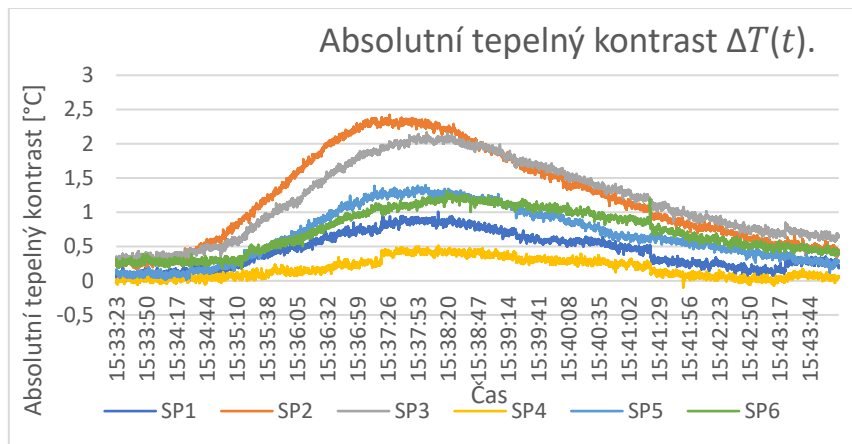
Obrázek 33. Průběh teploty vybraných bodů (v prostředí Excel)



Dalším krokem spočítáme a sestavíme graf absolutního tepelného kontrastu každého měřeného bodu v čase  $t$ .  $\Delta T(t)$ .

$$\Delta T(t) = T_d(t) - T_{S_a}(t)$$

$T_d(t)$  je teplota v místě nad defektem v čase  $t$ ,  $T_{S_a}(t)$  je teplota nepoškozené oblasti v čase  $t$ . Nepoškozená oblast  $S_a$  je definována třemi body v místech, kde nejsou žádné defekty. Pro výpočet bude použita jejich průměrná hodnota. K provedení těchto operací bude použit MS Excel.

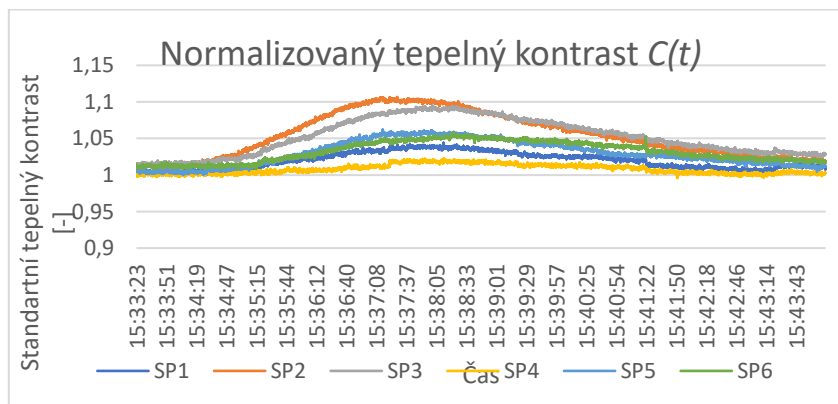


Obrázek 34. Absolutní tepelný kontrast  $\Delta T(t)$  vybraných bodů

Pro přehlednost také spočítáme a sestavíme graf takzvaného normalizovaného tepelného kontrastu každého měřeného bodu v čase  $t$ .  $C(t)$ .

$$C(t) = \frac{T_{def}(t) - T_{def}(t_0)}{T_{sound}(t) - T_{sound}(t_0)} [-] \quad (14)$$

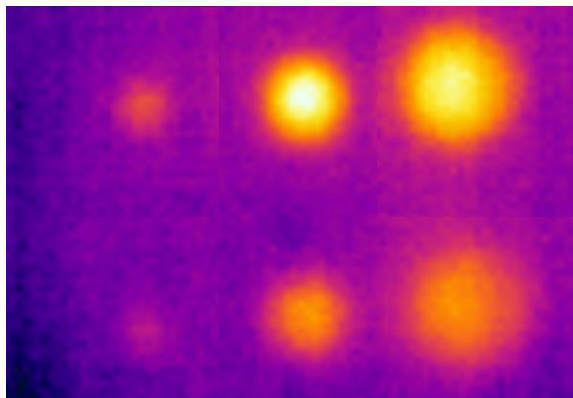
$T_{def}(t)$  je teplota v místě nad defektem v čase  $t$ ,  $T_{def}(t_0)$  je teplota v místě nad defektem v momentě začátku vlastního chladnutí.  $T_{sound}(t)$  je teplota nezávadné oblasti vzorku v čase  $t$ ,  $T_{sound}(t_0)$  je teplota nezávadné oblasti vzorku v momentě začátku vlastního chladnutí.



Obrázek 35. Normalizovaný tepelný kontrast  $C(t)$  vybraných bodů

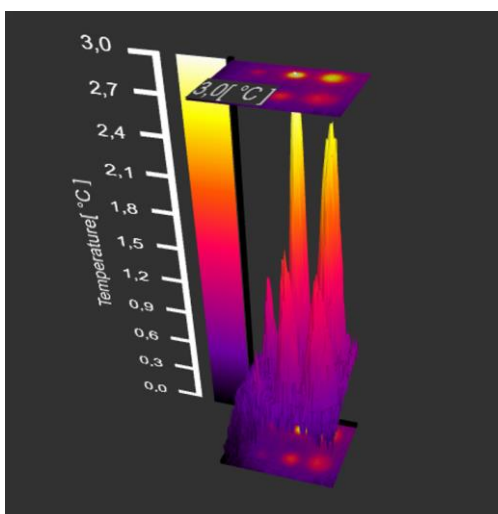
Z obou grafů je vidět, že chování křivek průběhu tepelného kontrastu v závislosti na čase je skoro stejné. Což je dobrý signál potvrzující správnost výpočtů. Teď máme k dispozici grafy, ze kterých se dá určit přesný čas pro každý bod měření, kdy hodnota tepelného kontrastu byla největší.

Sp1 – 4 min 26 s od začátku měření, Sp2 – 3 min 56 s, Sp3 – 4 min 36 s, Sp4 – 4 min 46 s, Sp5 – 4 min 26 s, Sp6 – 4 min 49 s. Na základě těchto hodnot můžeme v naší sekvenci snímků najít okamžik času pro každý defekt, kdy jeho tepelný kontrast má největší hodnotu. Poté odřízneme část termogramu pro každý defekt a sestavíme výsledný termogram zpracovaný metodou absolutního tepelného kontrastu (viz. obrázek 36).



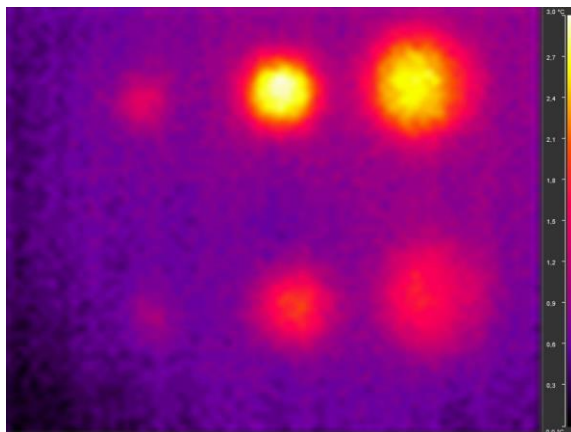
Obrázek 36. Výsledný termogram s největším tepelným kontrastem pro každý defekt

Pro zpracování sekvence snímků metodou (DAC) bude použit software CorePlayer od firmy Workswell. Začneme tím, že nahrajeme naměřenou sekvenci do prostředí programu. Pak v záložce «Analysis» zvolíme metodu (DAC) a během dvou minut obdržíme novou zpracovanou sekvenci metodou absolutního diferenciálního kontrastu. Výsledná sekvence je značně komprimovaná, protože vstupní verze trvá 10 minut 47 sekund a zpracovaná kolem dvou a půl minut. Daný program umožňuje sledovat průběh změn teploty na 3 D grafu (viz. obrázek 37).



Obrázek 37. 3D graf změn teploty zpracované sekvence metodou (DAC)

Pomocí tohoto 3D grafu je docela snadné určit okamžik, kdy každá vada má nejméně tepelný kontrast (viz. obrázek 38).



Obrázek 38. Termogram s nejméně tepelným kontrastem defektů po zpracování metodou (DAC)

### 6.3 Testování metody aktivní termografie na dvou různých materiálech

Pro tento úkol bylo navrženo použít vzorek z polystyrenu a dřevotřísky. Jsou to dvě desky stejné velikosti se shodným uspořádáním a rozměry defektů. Jelikož v první řadě hovoříme o porovnání určité metody na dvou různých materiálech, tak bylo rozhodnuto provádět měření za naprosto stejných podmínek, aby konečný výsledek byl co nejvíce ovlivněn pouze materiálem vzorků.

Je pravdou, že se nejedná o nejpoužívanější materiály, na kterých je aktivní termografie aplikována. Ale v rámci experimentu a zkoumání metod termografie jsou to docela vhodné materiály svou dostupností, cenou a snadností obrábění.

Měření tohoto úkolu proběhne skoro stejně jako u předchozího zadání. Testované vzorky po jednom umístíme na určené místo a pomocí stroboskopu metodou krokového ohřevu provedeme měření. Mimochodem, oba vzorky byly na obou stranách pokryty stejnou lepicí páskou. Bylo to uděláno, aby měřený povrch měl stejnou emisivitu, odráženou zdánlivou teplotu a drsnost. Jak již bylo zmíněno pro nejméně identické podmínky při měření.

Pro každý vzorek bylo provedeno několik měření s odlišnou dobou ohřevu. Ze všech experimentů bylo vybráno dva nejzajímavějších pro dřevotřísku a dva pro polystyren. U každého měření jako první se objevovaly otvory o průměru 50/35 mm a hloubce 14 mm. Dále projevily otvory 20 mm průměr/14 mm hloubka, 50/35 mm průměr/9 mm hloubka a jako poslední a nejméně viditelný otvor o průměru 20 mm a hloubce 9 mm.

●Deska z dřevotřísky:

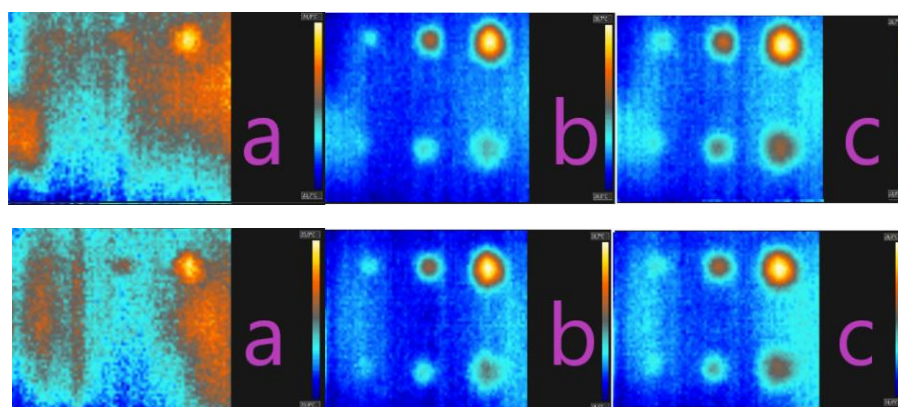
(1) - Long pulse uptime 50 %, doba ohřevu 1 minuta 40 sekund, doba měření 4 minuty 40 sekund, první vada 1 minuta 12 sekunda, viditelnost všech vad 2 minuta 57 sekunda, nejlepší viditelnost všech vad 3 minuta 55 sekunda.

(2) - Long pulse uptime 50 %, doba ohřevu 1 minuta, doba měření 3 minuty 51 sekunda, první vada 1 minuta 21 sekunda, viditelnost všech vad 3 minuta 8 sekunda, nejlepší viditelnost všech vad 3 minuta 20 sekunda.

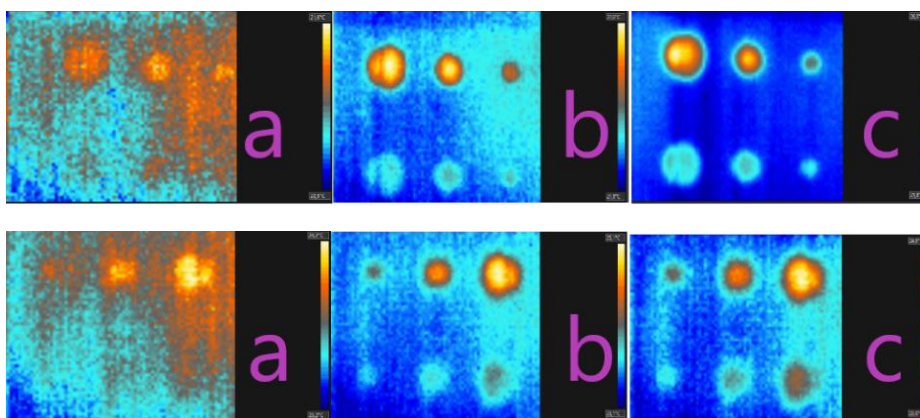
●Deska z polystyrenu:

(1) - Long pulse uptime 50 %, doba ohřevu 40 sekund, doba měření 2 minuty 10 sekund, první vada 20 sekunda, viditelnost všech vad 53 sekunda, nejlepší viditelnost všech vad 1 minuta 53 sekunda.

(2) - Long pulse uptime 50 %, doba ohřevu 30 sekund, doba měření 2 minuty, první vada 23 sekunda, viditelnost všech vad 56 sekunda, nejlepší viditelnost všech vad 1 minuta 24 sekunda.



Obrázek 39. Deska z dřevotřísky (Long pulse uptime 50 %) (1 - shora, 2 - zdola); a – viditelnost prvních otvorů, b – viditelnost všech otvorů, c – nejlepší viditelnost otvorů



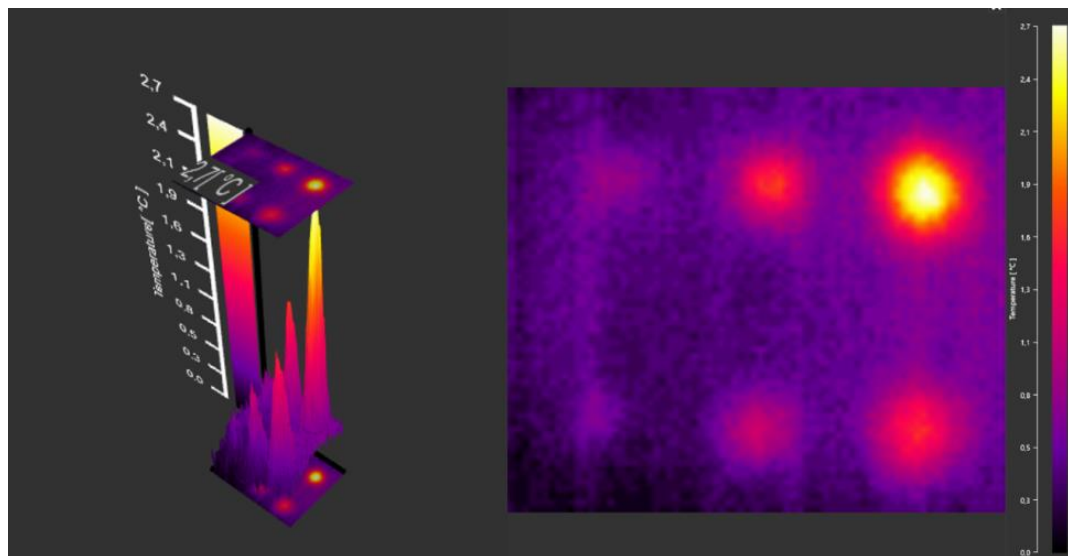
Obrázek 40. Deska z polystyrenu (Long pulse uptime 50 %) (1 - shora, 2 - zdola); a – viditelnost prvních otvorů, b – viditelnost všech otvorů, c – nejlepší viditelnost otvorů

Během experimentu se ukázalo, že vzorek vyrobený z polystyrenu se prohřívá mnohem rychleji než z dřevotřísky. Viditelnost všech vad nastává o 2 minuty dříve. Na první pohled je to nelogické, protože součinitel tepelné vodivosti dřevotřísky je minimálně třikrát vyšší než u polystyrenu. Na základě toho bylo rozhodnuto provést další experiment. Byl odebrán kus polystyrenu trochu odlišné homogenity o tloušťce přibližně 6 cm s vyrobeným otvorem hloubkou kolem 2,5 cm (viz. obrázek 41). Cílem je vyzkoušet krokový ohřev pomocí stroboskopu na tomhle vzorku. Jakmile se stroboskop zapnul, ukázalo se, že i tak tlustý kus tohoto teplo izolačního materiálu propouští značnou část světla skrz sebe. Vnitřní defekt byl viditelný během několika sekund po zapnutí stroboskopu. A to znamená, že princip excitace tohoto materiálu optickou metodou nefunguje úplně tak, jak je popsáno výše v teorii. Světelná energie by měla dopadat na spodní povrch a přeměňovat se na tepelnou, která se bude šířit vedením po celém objemu. Místo toho část světla proniká materiálem a již v horních vrstvách se světelná energie mění na tepelnou, a proto se takový materiál ohřívá mnohem rychleji. Určitě jsou to dva různé typy polystyrenu a náš vzorek má mnohem hustší strukturu, a navíc má pokrytý povrch izolační páskou. Nicméně je to jediný logický důvod proč to tak je.

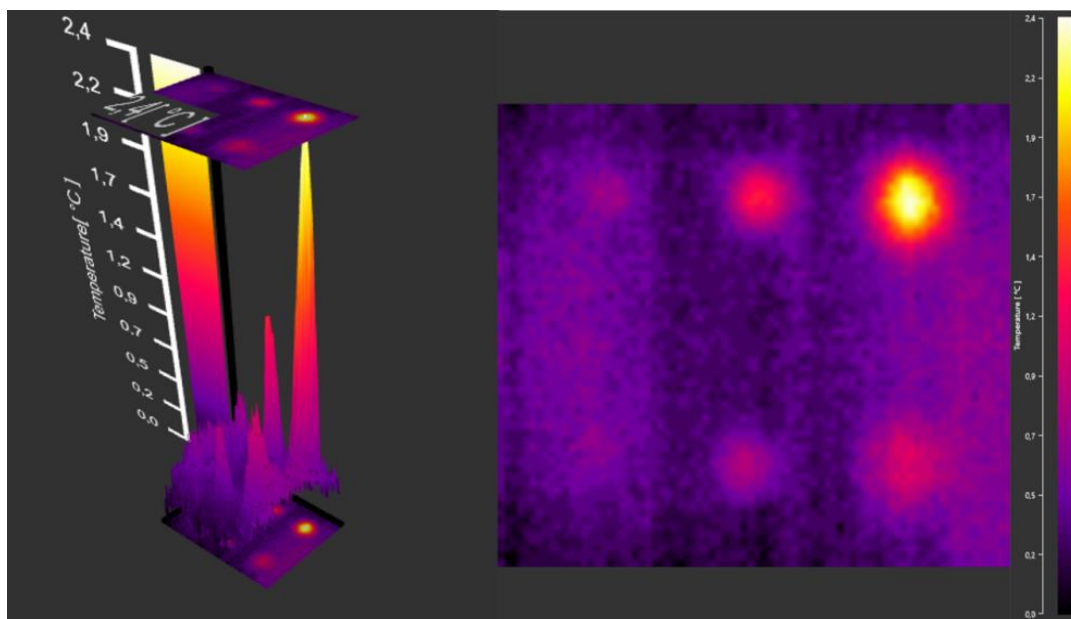


Obrázek 41. Zkušební vzorek – kus polystyrenu

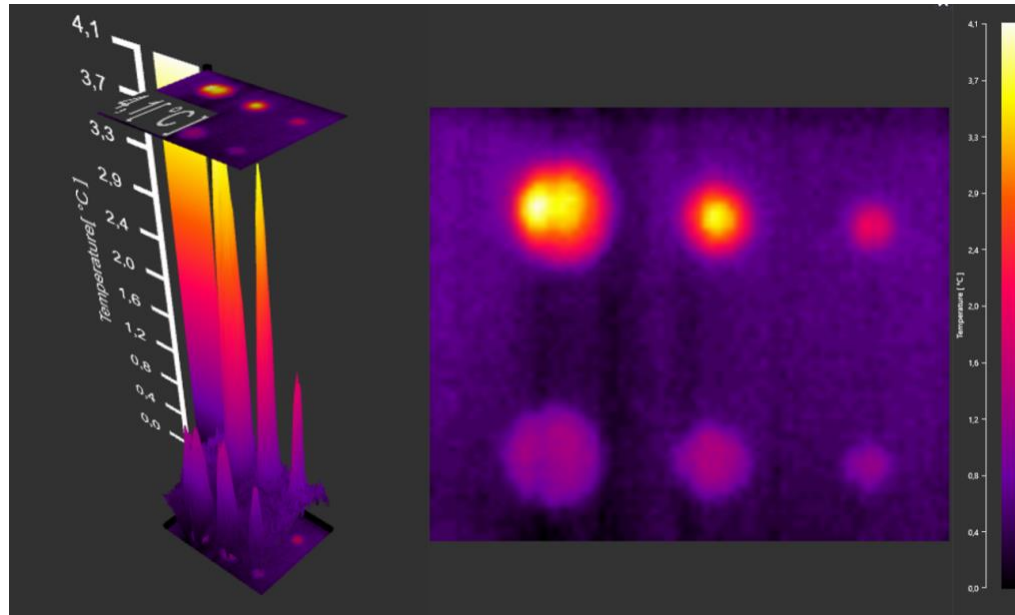
Stejně jako pro izolované dveře, použijeme metodu diferenciálního tepelného kontrastu (DAC) ke zpracování naměřené sekvence snímků.



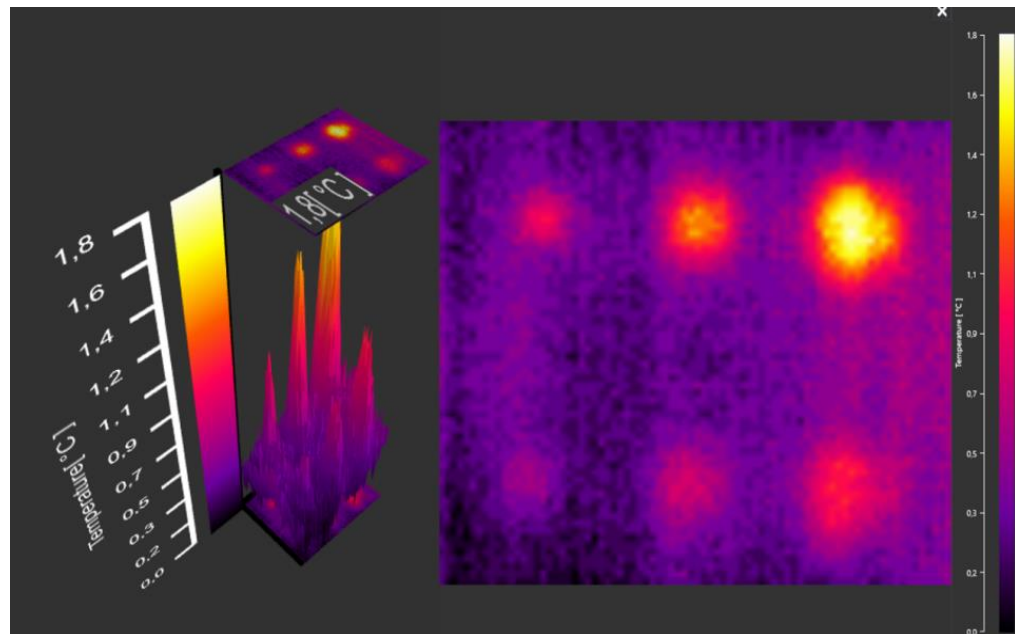
Obrázek 42. Deska z dřevotřísky (1) - 3D graf a nejvýraznější tepelný kontrast defektů po zpracování metodou (DAC)



Obrázek 43. Deska z dřevotřísky (2) - 3D graf a nejvýraznější tepelný kontrast defektů po zpracování metodou (DAC)



Obrázek 44. Deska z polystyrenu (1) - 3D graf a nejvýraznější tepelný kontrast defektů po zpracování metodou (DAC)



Obrázek 45. Deska z polystyrenu (2) - 3D graf a nejvýraznější tepelný kontrast defektů po zpracování metodou (DAC)

## 7. ZÁVĚR

V průběhu této práce jsem nastudoval problematiku termografie a základní principy aktivní termografie. Pro praktické naučení aktivní termografie byl sestaven vhodný zkušební vzorek, na kterém jsem testoval jednu z metod aktivní termografie. Pro daný specifický vzorek byla použita optická metoda excitace s následným zpracováním 2D signálů metodou diferenciálního absolutního tepelného kontrastu (DAC). Výsledky tohoto experimentu byly docela pozitivní. Zvolená metoda excitace a tepelné stimulace zvládla ohřát vzorek s docela velkou tloušťkou teplotně izolačního materiálu. Dosáhli jsme toho, že každý defekt byl jasně viditelný. V našem případě byly defekty ve formě různých velikostí s různou hloubkou (vzdálenost od měřeného povrchu). V průběhu pozorování sekvence termogramů a na základě výsledného termogramu jsme zjistili, že na detekovatelnost defektů má vliv nejen jeho hloubka, ale i průměr. Nejtěžší bylo objevit vadu s průměrem 20 mm a hloubkou 10 mm. Použitá metoda zpracování 2D signálu se také ukázala jako vhodná pro tento úkol. Na konci jsem dostal kvalitativně zpracovaný termogram s výraznějším kontrastem podpovrchových vad. Byly sestaveny grafy absolutního a normalizovaného tepelného kontrastu, ve kterých chování křivek bylo téměř stejné a v souladu s vizuálním pozorováním sekvence termogramů.

Dalším úkolem bylo porovnat konkrétní metodu aktivní termografie na dvou různých materiálech. Jako zkušební vzorky byly vybrány dvě desky stejné velikosti z dřevotřísky a polystyrenu. Během experimentu jsem přišel na to, že materiál s mnohem nižší tepelnou vodivostí se ohřívá daleko rychleji. Důvod tohoto jevu byl v práci popsán na základě získaných znalostí během zpracování tohoto tématu bakalářské práce. Na tyto dva vzorky byla stejně aplikována metoda (DAC), která se docela dobře projevila.

Existuje celá řada metod nedestruktivního testování. Nicméně aktivní termografie kvůli mnoha výhodám je perspektivní metodou, kterou lze aplikovat v mnoha průmyslových odvětvích. Nejlepší uplatnění bych viděl v automobilovém, leteckém a kosmickém průmyslu, kde je na prvním místě velmi důležitá kontrola kvality vyráběných dílů. V naší práci byly použity docela jednoduché zkušební vzorky s dost primitivními připravenými defekty, jelikož naším cílem bylo pouze otestovat aktivní termografii pomocí jedné z metod. Po získaných pozitivních výsledcích bych pokračování této práce viděl v aplikaci aktivní termografie, kde zkušebním vzorkem bude reální díl, který se testuje při výrobě.



## Použitá literatura:

- [1] FLUKE®. Úvod do principů termografie [online]. [vid. 10.02.2022]. Dostupné z: [https://www.vut.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=65646](https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=65646)
- [2] HELEBRANT, F., MONI, V., BLATA, J.: STUDIJNÍ PODKLADY – TERMOGRAFIE [online]. VŠB TU OSTRAVA, 2010. [vid. 10.02.2022]. Dostupné z: <https://www.fs.vsb.cz/export/sites/fs/340/.content/galerie-souboru/vyuka/Termografie-studijni-podklady.pdf>
- [3] W – TECHNIKA GROUP. TERMOVIZE [online]. [vid. 10.02.2022]. Dostupné z: <https://www.termokamery-flir.cz/termovize-a-termoviznikamery/>
- [4] WORKSWELL. ABSOLUTNĚ ČERNÉ TĚLESO [online]. [vid. 10.02.2022]. Dostupné z: <https://workswell.cz/cerne-teleso-etalon-pro-termografie/>
- [5] TESTO. PRŮVODCE TERMOGRAFIÍ [online]. [vid. 10.02.2022]. Dostupné z: <https://www.termokamery-testo.cz/prirucka-termografie/>
- [6] JANKŮ, MICHAL, STRYK, JOZEF: METODIKA – UPLATNĚNÍ TERMOGRAFIE PŘI DIAGNOSTICE OBJEKTŮ DOPRAVNÍ INFRASTRUKTURY [online]. CENTRUM DOPRAVNÍHO VÝZKUMU. [vid. 10.02.2022]. Dostupné z: [https://www.mdcz.cz/getattachment/Dokumenty/Veda-a-vyzkum/Certifikovane-metodiky/Metodika-Uplatneni-termografie-pri-diagnostice-ob/Metodika\\_Termografie.pdf.aspx](https://www.mdcz.cz/getattachment/Dokumenty/Veda-a-vyzkum/Certifikovane-metodiky/Metodika-Uplatneni-termografie-pri-diagnostice-ob/Metodika_Termografie.pdf.aspx)
- [7] TERMOKAMERA.CZ. TABULKA EMISIVIT [online]. [vid. 10.02.2022]. Dostupné z: <http://www.termokamera.cz/tabulka-emisivit/>
- [8] SOVA, JAN: BEZDOTYKOVÉ MĚŘENÍ TEPLOTNÍCH POLÍ [online]. Aldebaran Group for Astrophysics, 2017. [vid. 10.02.2022]. Dostupné z: [https://www.aldebaran.cz/bulletin/2017\\_19\\_erm.php](https://www.aldebaran.cz/bulletin/2017_19_erm.php)
- [9] WORKSWELL. STANOVENÍ EMISIVITY KONTAKTNÍ/BEZKONTAKTNÍ METODOU [online]. [vid. 10.02.2022]. Dostupné z: <https://workswell.cz/stanoveni-emisivity-termokamerou-kontaktni-bezkontakti-metodou/>
- [10] WORKSWELL. STANOVENÍ ODRAŽENÉ ZDÁNLIVÉ TEPLoty NEPŘÍMOU METODOU [online]. [vid. 10.02.2022]. Dostupné z: <https://workswell.cz/stanoveni-odrazene-zdanlive-teploty-neprihou-metodou/>
- [11] TERMOKAMERA.CZ. PARAMETRY TERMOKAMERY [online]. [vid. 10.02.2022]. Dostupné z: <http://www.termokamera.cz/princip-a-funkce/parametry-termokamery/>
- [12] WORKSWELL. Jak daleko by měl být měřený objekt od termokamery? [online]. [vid. 10.02.2022]. Dostupné z: <https://workswell.cz/jak-daleko-by-mel-byt-mereny-objekt-od-termokamery/>

- [13] WORKSWELL. NDT SYSTÉM PRO AKTIVNÍ TERMOGRAFII [online]. [vid. 10.02.2022]. Dostupné z: <https://workswell.cz/ndt-aktivni-termografie/>
- [14] W – TECHNIKA GROUP. AKTIVNÍ TERMOGRAFIE JAKO METODA NDT [online]. [vid. 10.02.2022]. Dostupné z: <https://www.termokamery-flir.cz/aktivni-termografie-jako-metoda-ndt-nedestruktivniho-testovani/>
- [15] IBARRA-CASTANEDO, C., GENEST, M., GUIBERT, S.: INSPECTION OF AEROSPACE MATERIALS BY PULSED THERMOGRAPHY, LOCK-IN THERMOGRAPHY AND VIBROTHERMOGRAPHY: A COMPARATIVE STUDY [online]. LAVAL UNIVERSITY, QUEBEC CITY, CANADA, 2007. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/229014901\\_Inspection\\_of\\_aerospace\\_materials\\_by\\_pulsed\\_thermography\\_lock-in\\_thermography\\_and\\_vibrothermography\\_A\\_comparative\\_study](https://www.researchgate.net/publication/229014901_Inspection_of_aerospace_materials_by_pulsed_thermography_lock-in_thermography_and_vibrothermography_A_comparative_study)
- [16] ŠRAJBR, CH., DILLENZ, A., BRAUTIGAM, K.: CRACK DETECTION AT ALUMINUM FUSELAGES BY INDUCTION EXCITED THERMOGRAPHY [online]. EDEVIS GmbH STUTTGART. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/295073387\\_Crack\\_Detection\\_at\\_Aluminum\\_Fuselages\\_by\\_Induction\\_Excited\\_Thermography](https://www.researchgate.net/publication/295073387_Crack_Detection_at_Aluminum_Fuselages_by_Induction_Excited_Thermography)
- [17] IBARRA-CASTANEDO, C., AVDELIDIS, N., GRENIER, M.: ACTIVE THERMOGRAPHY SIGNAL PROCESSING TECHNIQUES FOR DEFECT DETECTION AND CHARAKTERIZATION ON COMPOSITE MATERIALS [online]. PROC. SPIE 7661, THERMOSENSE XXXII, 766100, 2010. Dostupné z: [Proceedings \(spiedigitallibrary.org\)](https://proceedings.spiedigitallibrary.org)
- [18] PANELLA, F., W., PIRINU, A.: APPLICATION OF PULSED THERMOGRAPHY AND POST-PROCESSING TECHNIQUES FOR CFRP INDUSTRIAL COMPONENTS [online]. JOURNAL OF NONDESTRUCTIVE EVALUATION, 2021. Dostupné z: [Application of Pulsed Thermography and Post-processing Techniques for CFRP Industrial Components | SpringerLink](#)
- [19] LYSENKO, VLADIMÍR: SENZORY NEELEKTRICKÝCH VELIČIN 2. DÍL, DETEKTORY PRO BEZDOTYKOVÉ MĚŘENÍ TEPLŮ, BEN TECHNICKÁ LITERATURA, 2005 (NTK).
- [20] LANGENKAMP, M.: LOCK-IN THERMOGRAPHY: BASICS AND USE FOR EVALUATING ELECTRONIC DEVICES AND MATERIALS, SPRINGER, 2010 (AMAZON).
- [21] ČSN ISO 18434-1 (011465) Monitorování stavu a diagnostika strojů – Termografie – Část 1: Všeobecné postupy. ICS 17.160 červenec 2009. TMV SS spol. s. r. o., IČ 44849443, Ing. Jiří Svoboda.
- [22] DRONEGENUITY. What are SWIR, MWIR, and LWIR – And what do they mean? [online]. [vid. 10.02.2022]. Dostupné z: <https://www.dronegenuity.com/what-are-swir-mwir-and-lwir-and-what-do-they-mean/>

## Seznam obrázku:

1. Obrázek 1. Elektromagnetické spektrum  
<https://www.fs.vsb.cz/export/sites/fs/340/.content/galerie-souboru/vyuka/Termografie-studijni-podklady.pdf>
2. Obrázek 46. Složky záření vstupující do termokamery.  $\epsilon$ -vyzáření,  $\rho$ -odražené,  $\tau$ -přenesené <https://www.termokamery-testo.cz/prirucka-termografie/>
3. Obrázek 3. Model termografického měření povrchové teploty  
[https://www.aldebaran.cz/bulletin/2017\\_19\\_erm.php](https://www.aldebaran.cz/bulletin/2017_19_erm.php)
4. Obrázek 4. Vliv emisivity na výsledek měření <https://www.termokamery-testo.cz/prirucka-termografie/>
5. Obrázek 5. Ovlivnění měření odraženým zářením <https://workswell.cz/stanoveni-odrazene-zdanlive-teploty-neprihou-metodou/>
6. Obrázek 47. *Měření odražené zdánlivé teploty*
7. Obrázek 48. Zorné pole jednoho jediného pixelu <https://www.termokamery-testo.cz/prirucka-termografie/>
8. Obrázek 8. Kalkulátor zorného pole <https://workswell.cz/kalkulator-zorneho-pole/>
9. Obrázek 9. Konfigurace systému pro aktivní termografii <https://www.termokamery-flir.cz/aktivni-termografie-jako-metoda-ndt-nedestruktivniho-testovani/>
10. Obrázek 10. Reakce defektu na zdroj buzení a vliv defektu na vyzařování na povrchu  
<https://www.termokamery-flir.cz/aktivni-termografie-jako-metoda-ndt-nedestruktivniho-testovani/>
11. Obrázek 11. Rozdělení metod aktivní termografie <https://www.termokamery-flir.cz/aktivni-termografie-jako-metoda-ndt-nedestruktivniho-testovani/>
12. Obrázek 12. Experimentální konfigurace pulzní termografie
13. Obrázek 13. (a)-teplotní 3D matice, (b)-chování křivek povrchového chlazení
14. Obrázek 14. Experimentální konfigurace lock-in termografie
15. Obrázek 15. Schéma indukční excitace pro detekci trhlin
16. Obrázek 16. Hloubka průniku vířivých proudů jako funkce indukční frekvence
17. Obrázek 17. Experimentální konfigurace sekvenční vibrotermografie (vlevo) a lock-in vibrotermografie (vpravo)
18. Obrázek 18. Schematický model pracoviště: 1 - termokamera, 2 - zkušební vzorek, 3 - excitační zdroj, 4 - počítač s nainstalovaným softwarem
19. Obrázek 19. Navržené termografické pracoviště
20. Obrázek 20. Termokamera FLIR A5
21. Obrázek 21. Zkušební vzorek – izolované dveře
22. Obrázek 22. Schéma umístění otvorů ve zkušebním vzorku
23. Obrázek 23. Zkušební vzorky – deska z dřevotřísky a polystyrenu

24. Obrázek 24. Pracovní plocha programu FLIR Tools+
25. Obrázek 25. Pracovní plocha programu Workswell CorePlayer
26. Obrázek 26. Stroboskop Eurolite Superstroke 2700
27. Obrázek 27. Nejvíc dosažená ustálená teplota povrchu vzorku
28. Obrázek 28. První měření (*Long pulse uptime 35 %*). a – viditelnost prvních otvorů, b – viditelnost všech otvorů, c – nejlepší viditelnost otvorů
29. Obrázek 29. Druhé měření (*Long pulse uptime 50 %*). a – viditelnost prvních otvorů, b – viditelnost všech otvorů, c – nejlepší viditelnost otvorů
30. Obrázek 30. Třetí měření (*Long pulse uptime 60 %*). a – viditelnost prvních otvorů, b – viditelnost všech otvorů, c – nejlepší viditelnost otvorů
31. Obrázek 31. Čtvrté měření (*Long pulse uptime 40 %*). a – viditelnost prvních otvorů, b – viditelnost všech otvorů, c – nejlepší viditelnost otvorů
32. Obrázek 32. Průběh teplot vybraných bodů (v prostředí FLIR Tools)
33. Obrázek 33. Průběh teploty vybraných bodů (v prostředí Excel)
34. Obrázek 34. Absolutní tepelný kontrast  $\Delta T(t)$  vybraných bodů
35. Obrázek 35. Normalizovaný tepelný kontrast  $C(t)$  vybraných bodů
36. Obrázek 36. Výsledný termogram s největším tepelným kontrastem pro každý defekt
37. Obrázek 37. 3D graf změn teploty zpracované sekvence metodou (DAC)
38. Obrázek 38. Termogram s nejvýraznějším tepelným kontrastem defektů po zpracování metodou (DAC)
39. Obrázek 39. Deska z dřevotřísky (*Long pulse uptime 50 %*), (1 - shora, 2 - zdola); a – viditelnost prvních otvorů, b – viditelnost všech otvorů, c – nejlepší viditelnost otvorů
40. Obrázek 40. Deska z polystyrenu (*Long pulse uptime 50 %*), (1 - shora, 2 - zdola); a – viditelnost prvních otvorů, b – viditelnost všech otvorů, c – nejlepší viditelnost otvorů
41. Obrázek 41. Zkušební vzorek – kus polystyrenu
42. Obrázek 42. Deska z dřevotřísky (1) - 3D graf a nejvýraznější tepelný kontrast defektů po zpracování metodou (DAC)
43. Obrázek 43. Deska z dřevotřísky (2) - 3D graf a nejvýraznější tepelný kontrast defektů po zpracování metodou (DAC)
44. Obrázek 44. Deska z polystyrenu (1) - 3D graf a nejvýraznější tepelný kontrast defektů po zpracování metodou (DAC)

45. Obrázek 45. Deska z polystyrenu (2) - 3D graf a nejvýraznější tepelný kontrast defektů po zpracování metodou (DAC)